

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Reposição de Serviço em Sistemas com Elevada Produção Eólica

João André Antunes de Pinho Simões Dionísio

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor João Abel Peças Lopes

Co-orientador: Professor Luís Miguel Lopo Santos Seca

24 de Julho de 2014

A Dissertação intitulada

“Reposição de Serviço em Sistemas com Elevada Produção Eólica”

foi aprovada em provas realizadas em 18-07-2014

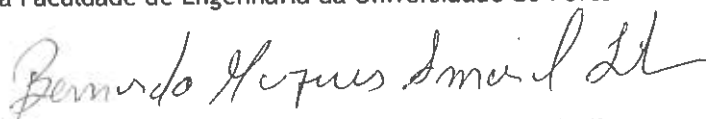
o júri



Presidente

Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Bernardo Marques Amaral Silva

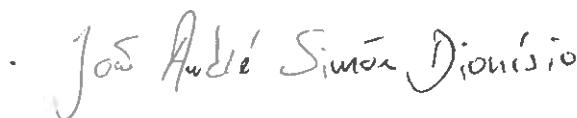
Professor Adjunto da Escola Superior de Ciência e Tecnologia ISPGaya



Professor Doutor João Abel Peças Lopes

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - João André Antunes de Pinho Simoes Dionísio

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Estando os consumidores cada vez mais dependentes de um serviço de energia contínuo, de qualidade crescente e procurando os Operadores de Sistema novas medidas e tecnologias para melhorar tais serviços, esta dissertação vem assim inserir-se num meio que tem vindo a ser alvo de estudo nas últimas décadas mas que se encontra em constante mudança.

Apesar da sua ocorrência ter diminuído, as perturbações capazes de colocar o Estado do Sistema em colapso são uma realidade permanente e de forte preocupação por parte dos Operadores. A introdução de novas fontes de geração (Produção Dispersa) numa rede inicialmente idealizada com grandes unidades centralizadas onde o fluxo de potência era unidirecional, provocou um aumento na probabilidade desse tipo de distúrbios acontecer. Torna-se então fulcral um conhecimento atualizado do estado e constituintes da rede bem como uma rápida intervenção e preparação por parte do Operador na eventualidade de tal acontecimento ocorrer.

A reposição de serviço é um vasto tema que com a evolução das tecnologias presentes nos Sistemas Elétricos de Energia (novos tipos de geração e sistemas de proteção mais rápidos e potentes) tem sofrido um estudo constante por parte da comunidade científica. Tratando-se de um problema complexo, multiobjetivo e fortemente dependente do S.E.E. onde é aplicada, explorou-se neste trabalho um conjunto de sequências de ações otimizadas em redes com e sem Produção Dispersa, mais especificamente, geração eólica.

A exploração da rede através da criação de ilhas elétricas, proporcionando assim a hipótese de uma estratégia de reposição de serviço paralela, foi também estudada. As restrições necessárias para que tal cenário seja concretizável, bem como as condições impostas pela estratégia de reposição escolhida, são fortes condicionantes que foram identificadas e analisadas.

Nesta dissertação apresenta-se então o desafio de encontrar uma sequência de reposição de serviço após uma forte perturbação, onde são consideradas as várias restrições do sistema e seus constituintes de geração, transporte e consumo e das prioridades inerentes a uma estratégia de reposição.

Palavras Chave

- Reposição de Serviço
- Ilhas Elétricas

Abstract

Having the consumers been more dependent on a reliable and quality growing energy service and having Systems Operators been seeking new approaches and technologies to improve that same service, this thesis finds itself in this field that has been a subject of investigation over the last decades.

Despite having its occurrence been less frequent, power outages able of collapsing the power system are an enduring reality and of great concern by the System Operators. The admittance of new generating sources (Distributed Generation) in a network initially thought with large centralised units with a one-way power flow gave rise to an increase of the possibility of those outages occur. It is then crucial an updated understanding of the network's state and elements as well as a swift intervention and preparation by the System Operator in the likelihood of this event happening.

System restoration is a wide field which with the evolution of the technologies in Electric Power Systems (new generation ways and faster system protections) has suffered an unchanging study by the science community. Being a complex problem, multi-objective and strongly dependent on the Electric Power System where it is set, was investigated in this work a range of sequences of optimized actions in networks with and without Distributed Generation, specifically wind generation.

The network's operation through electrical islands, providing this way the chance of a parallel restoration strategy was also studied. The necessary constraints which make this situation possible as well as the conditions imposed by the chosen restoration strategy are strong determinant factors which were identified and analysed.

This dissertation presents the challenge of finding a restoration strategy after a major power outage has taken place where several constraints related to the system and its equipment, transport and load pickup have to be considered.

Keywords

- Service Restoration
- Electrical Islands

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer e dedicar esta dissertação à minha família, nomeadamente à minha mãe e ao meu pai, por todo o apoio, esforço, dedicação e resiliência que revelaram ao longo da minha vida académica, pois não só despertaram em mim um gosto pela cultura, como também me proporcionaram todas as condições para a consecução deste projeto.

Aos dois, o meu muito obrigado!

Ao meu orientador, Professor Doutor João Abel Peças Lopes, por partilhar do mesmo entusiasmo relativamente a este projeto, pelo apoio e constante disponibilidade para a discussão de ideias. Também ao meu co-orientador, Professor Luís Miguel Lopo dos Santos Seca, pela co-operação e fornecimento de material necessário à compreensão das especificidades e conceitos presentes nesta dissertação.

O meu agradecimento dirige-se igualmente ao investigador do INESC Porto, Hélder Magalhães da Costa, por me orientar na continuação do seu trabalho, partilhando as mesmas angústias e alegrias que este projeto proporcionou.

À Maria João Nogueira, o meu muito obrigado pela dedicação, perseverança e fundamentalmente por me ter reacendido o gosto pelos números.

Pelos cinco anos de vivências, experiências e aprendizagens partilhados com os colegas da faculdade, que também contribuíram para o alcance deste objetivo.

E, por fim, aos meus amigos de infância, do secundário e da faculdade, por me conseguirem incentivar nos momentos precisos e por me distraírem nos restantes!

João André

“Discovery consists of seeing what everybody has seen, and thinking what nobody has thought.”

Albert Szent-Gyorgyi

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Estado da Arte	5
2.1	Reposição de Serviço	5
2.1.1	Motivos que originam a Reposição de Serviço	5
2.1.2	Definição do conceito	6
2.1.3	Estratégias	9
2.1.4	Problemas associados	13
2.2	Ilhas Elétricas	15
2.2.1	Capacidade de <i>Blackstart</i>	16
3	Plataforma de simulação e Modelização do Sistema	19
3.1	Introdução	19
3.2	EUROSTAG	20
3.3	O Sistema no EUROSTAG	23
3.3.1	Linhas	23
3.3.2	Transformadores	24
3.3.3	Unidades de Geração	24
3.3.4	Cargas	34
4	Casos de Estudo e Resultados obtidos	37
4.1	A Rede e os seus Constituintes	37
4.2	Caso de Estudo 1	40
4.3	Caso de Estudo 2	48
4.4	Caso de Estudo 3	57
4.5	Conclusões	66
5	Conclusões e Perspetivas Futuras	69
5.1	Reposição de Serviço e Ilhas Elétricas	69
5.2	Perspetivas Futuras	71
A	Loren Ipsum	73
A.1	O que é o <i>Loren Ipsum</i> ?	73
A.2	De onde Vem o Loren?	73
A.3	Porque se usa o Loren?	74
A.4	Onde se Podem Encontrar Exemplos?	74

Referências**75**

Lista de Figuras

2.1	Os diferentes estados da rede segundo Dy Liacco em [1]	6
2.2	Os estados da rede segundo L. Fink e K. Carlsen em [2]	7
2.3	Estratégia de Reposição segundo [3]	12
2.4	Plano de Reposição com capacidade de <i>Blackstart</i> segundo [4].	17
3.1	Menu principal do EUROSTAG	22
3.2	Modelo equivalente em Pi	24
3.3	Modelo do transformador simplificado de razão real fixa	24
3.4	Características de uma máquina síncrona implementadas no EUROSTAG	25
3.5	Diagrama de blocos do modelo DC1A	27
3.6	Esquema de inicialização do modelo DC1A	28
3.7	Esquema principal do modelo DC1A	28
3.8	Diagrama de blocos do modelo Gover	29
3.9	Esquema de inicialização do modelo Gover	29
3.10	Esquema principal do modelo Gover	30
3.11	Característica limitativa do modelo UEL2	30
3.12	Característica da potencia ativa com e sem <i>deload</i>	32
3.13	Diagrama de blocos do molelo PLOAD	33
3.14	Esquema principal do modelo PLOAD	33
3.15	Diagrama de blocos do molelo QLOAD	34
3.16	Esquema principal do modelo QLOAD	34
3.17	Representação gráfica de uma carga no EUROSTAG	35
4.1	Diagrama Unifilar do S.E.E. do Caso de Estudo 1	40
4.2	Sequência de ações de Reposição de Serviço do Caso de Estudo 1	41
4.3	Evolução da frequência no barramento 10 do Caso de Estudo 1	43
4.4	Evolução da potência ativa e reativa na linha 15-29 do Caso de Estudo 1	44
4.5	Evolução da tensão e frequência no barramento 14 do Caso de Estudo 1	45
4.6	Evolução da potência ativa gerada pelas máquinas GEN4 e GEN6 do Caso de Estudo 1	46
4.7	Evolução da potência reativa gerada pela máquina GEN4 do Caso de Estudo 1	47
4.8	Diagrama Unifilar do S.E.E. do Caso de Estudo 1	48
4.9	Sequência de ações de Reposição de Serviço do Caso de Estudo 2	49
4.10	Evolução da potência reativa gerada pelas máquinas GEN2 e GEN4 do Caso de Estudo 2	50
4.11	Evolução da frequência no barramento 21 do Caso de Estudo 2	52
4.12	Evolução da potência ativa geradas nas máquinas do Caso de Estudo 2	54
4.13	Evolução da potência ativa gerada nas máquinas GEN2 e GEN4 do Caso de Estudo 2	55

4.14	Evolução da potência reativa geradas nas máquinas do Caso de Estudo 2	56
4.15	Diagrama Unifilar do S.E.E. do Caso de Estudo 3	57
4.16	Sequência de ações de Reposição de Serviço do Caso de Estudo 3	58
4.17	Evolução da frequência no barramento 16 do Caso de Estudo 3	60
4.18	Evolução da potência ativa injetada no barramento 16 do Caso de Estudo 3	61
4.19	Evolução da potência reativa injetada no barramento 16 do Caso de Estudo 3 . .	62
4.20	Evolução da tensão no barramento 16 do Caso de Estudo 3	63
4.21	Evolução da potência ativa das máquinas do Caso de Estudo 3	64
4.22	Evolução da potência reativa das máquinas do Caso de Estudo 3	65
4.23	Potência Ativa na Linha de Transmissão 14-21 nos Casos de Estudo 1,2 e 3, res- petivamente	68

Lista de Tabelas

2.1	Principais problemas de operação na Reposição de Sistema presentes em [5] . . .	9
4.1	Características das linhas de transmissão	38
4.2	Características das máquinas síncronas	39

Abreviaturas e Símbolos

ADT	Abstract Data Type
ANDF	Architecture-Neutral Distribution Format
API	Application Programming Interface
CAD	Computer-Aided Design
CASE	Computer-Aided Software Engineering
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
UNCOL	UNiversal CCompiler-oriented Language
Loren	Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Sed vehicula lorem commodo dui
WWW	<i>World Wide Web</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A evolução dos Sistemas Elétricos de energia ao longo dos anos pode ser observada em duas áreas: através da rede e seus constituintes e da qualidade de serviço. Relativamente à primeira, existe uma mudança de paradigma que se pode considerar recente, tendo em conta a já longa existência dos S.E.E. (o primeiro criado data de 1882 por Thomas Edison). Esta é retratada por uma consciencialização ambiental, dado o consumo excessivo de combustíveis fósseis e do seu impacto nocivo no ambiente e por uma crescente mentalidade de otimização económica e energética por parte não só das entidades responsáveis, bem como pelo próprio consumidor. Assim, a rede teve de se adaptar e incorporar novas tecnologias como a geração eólica, hídrica e microgeração, todas incluídas na Produção Dispersa.

Relativamente à qualidade de serviço, observa-se que natural e consequentemente também foi melhorada. Através de novos mecanismos de controlo de tensão e frequência, a continuidade de serviço foi cada vez mais constante. Diretamente influenciada pelas inovações ocorridas ao nível da rede e seus constituintes, também a Produção Dispersa contribuiu para esta evolução ao proporcionar estes controlos a um nível mais próximo do consumo. Adicionalmente, e sendo ainda alvo de estudo por parte da comunidade científica, a utilização da PD como auxílio à Reposição de Serviço numa situação seguida de uma perturbação grave, representa também uma das evoluções neste campo.

Embora a probabilidade destes fortes distúrbios seja diminuta, não é nula e tendo em consideração as fortes consequências negativas que advêm de uma situação destas, é da maior importância o Operador possuir a preparação necessária para rapidamente intervir, bem como um conhecimento profundo e constantemente atualizado do estado da rede e dos seus constituintes.

A Reposição de Serviço é uma área de segurança e fiabilidade das redes, que atualmente ocupa um lugar primordial para os operadores de rede e empresas de energia. A capacidade e rapidez de resposta que a ambos lhes é exigida perante um defeito, revela-se cada vez mais importante e é um fator de qualidade de serviço que estes se comprometem a assegurar.

O problema da Reposição é quase tão antigo como o primeiro S.E.E., sendo contudo que só a partir de 1980 é que começaram a ser publicados os primeiros estudos sobre este assunto. Já nestes, é descrito como um problema que envolve inúmeras variáveis num sistema que se apresenta instável e com opções de atuação fortemente limitadas. O surgimento de novas tecnologias (capacidade de auto arranque) bem como da presença da PD contribuiu para simplificar certas restrições (energização de máquinas para procederem à inicialização), apresentando outras novas em compensação (dificuldade em encontrar uma sequência otimizada mediante os vários objetivos).

Esta mudança nas estratégias da Reposição de Serviço, associada com a Produção Dispersa, deu origem a mais uma área de forte interesse na investigação: a exploração da rede em ilha elétrica isolada. A PD surge assim como uma forte candidata ao auxílio no processo, contribuindo para a alimentação de máquinas sem capacidade de *blackstart* bem como para o controlo da regulação de frequência e tensão.

1.2 Objetivos

Mediante o anteriormente exposto, o objetivo principal desta dissertação foi perceber o impacto que uma dada sequência de ações de Reposição de Serviço tem num S.E.E. com Geração Eólica. Fazendo variar os constituintes da rede e as suas características, estudou-se o impacto que a PD, especificamente a geração eólica, tem num processo desta natureza. Partindo de um princípio de análise que envolveria a criação e posterior sincronização de ilhas elétricas, foram vários os campos de análise e estudo:

- Entendimento da complexidade inerente a uma estratégia geral de Reposição de Serviço, isto é, identificar prioridades e restrições que são em muitos casos comuns aos mais diversificados S.E.Es..
- Criação de Casos de Estudo que servissem de plataforma de comparação com o Caso de Estudo em que o objetivo principal desta dissertação é analisado.
- Estudo aprofundado de uma estratégia de Reposição de Serviço com recurso a ilhas elétricas. Para tal, foi desenvolvida uma rede em conformidade com este tipo de processo. Tendo em consideração o já extenso estudo nesta área, criou-se uma rede de dimensões propícias à implementação de tal estratégia.
- Análise da capacidade de auto arranque máquinas síncronas localizadas em pontos que específicos da rede e o seu impacto no processo de Reposição de Serviço.
- Avaliação do impacto da introdução da PD e posterior estudo da nova estratégia de Reposição.

Partindo do princípio que as estratégias de reposição de serviço dependem da rede, a criação da rede elétrica teve como base a maior aproximação possível da realidade, com o objetivo de simular com elevado grau de especificidade todas as possíveis reações do sistema e seus constituintes

às ações aplicadas. Para tal, foram explorados modelos de controlo de frequência e de tensão para as máquinas síncronas e modelos que simulassem o comportamento de um sistema eólico produtor. Com dados reais recolhidos pela bibliografia indicada, foram introduzidos na plataforma de simulação utilizada (EUROSTAG).

A análise dos resultados foi efetuada tendo em consideração a resposta do comportamento dinâmico do sistema, face à sequência de eventos introduzida. Para cada Caso de Estudo, as análises são apresentadas ao nível da tensão, frequência, potências ativa e reativa produzidas nas unidades de geração e trânsito de potências nas linhas de transmissão.

1.3 Estrutura da Dissertação

Por forma a melhor organizar e segmentar a informação estudada, conseguida e analisada ao longo desta dissertação, optou-se pela estrutura seguidamente descrita.

O capítulo 2, tal como o conceito de Estado de Arte define, proporciona a hipótese de um entendimento abrangente das temáticas abordadas nos Casos de Estudo (Reposição de Serviço e ilhas elétricas) recorrendo a publicações científicas de vários autores, com o intuito de proporcionar uma base de conhecimento.

O capítulo 3 pretende apresentar a ferramenta de simulação utilizada, o EUROSTAG, bem como o processo de modelização dos vários componentes constituintes da rede criada na plataforma em questão. Para cada elemento do sistema desenvolvido são apresentadas duas componentes: as características externas do equipamento e, caso se aplique, os modelos de controlo. No caso das linhas, transformadores e cargas apenas são definidos os primeiros. Já nas máquinas síncronas e sistema produtor eólico são analisados e explicados os reguladores usados para os definir.

O capítulo 4 exhibe os vários Casos de Estudo analisados. São inicialmente apresentadas as características dos equipamentos que são comuns a todos os casos, sendo posteriormente analisados. Assim, para cada um deles, é estudada a sequência de reposição de serviço encontrada, bem como o impacto desta no sistema e nos vários elementos constituintes da rede.

O capítulo 5 expõe as conclusões do trabalho desenvolvido, perspetivando possíveis abordagens e novos estudos.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Reposição de Serviço

O problema da Reposição de Serviço após um *blackout* total ou parcial é praticamente tão antigo como a própria indústria elétrica e, assim sendo, têm sido inúmeros os trabalhos de investigação desenvolvidos nesta área. Procurando-se cada vez mais um equilíbrio entre produção e consumo, associado a uma qualidade de serviço crescente, esta é uma área que, apesar do já longo período de existência, continua a ser um alvo de interesse por parte da comunidade científica.

2.1.1 Motivos que originam a Reposição de Serviço

Relativamente às perturbações, são causadas fenómenos temporários que rapidamente são eliminados pelos sistemas de proteção, tais como descargas atmosféricas e curto-circuitos, deixando assim o sistema numa situação instável. Contudo, uma elevada quota destes incidentes temporários provoca perturbações de longa duração, que variam desde perda de geração, saída de serviço de linhas de transmissão e, consequente, falha de alimentação de cargas. Assim, são estas as causas que originam uma falha parcial ou mesmo total do sistema.

A Reposição de Serviço ocorre quando existe uma perturbação tal que origina um *blackout* no S.E.E., colocando parte ou mesmo todo o sistema sem alimentação de energia elétrica. Tal acontece devido aos sistemas de proteção que atuam por forma a proteger os dispositivos elétricos das elevadas correntes que originam destes defeitos, interrompendo assim o fluxo do trânsito de potência e consequente alimentação das cargas. As perturbações que causam que apenas parte do S.E.E. fique desligado são ainda mais raras, dado que estes eventos, quando acontecem, provocam uma "cascata" de acontecimentos que são naturalmente seguidos pela atuação dos sistemas de proteção. O efeito é assim denominado pois a atuação de um conduzirá à ativação do seguinte, repetindo o processo até não existirem mais equipamentos de proteção.

2.1.2 Definição do conceito

Em 1967, T. E. Dy Liacco em [1], definiu que um sistema elétrico reside, em qualquer momento, num dos seguintes estados: Preventivo, de Reposição ou de Emergência, tal como se pode observar na Figura 2.1.

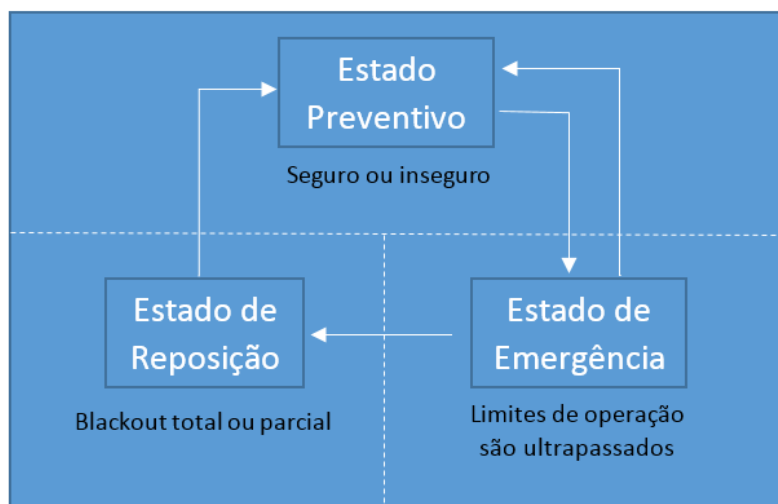


Figura 2.1: Os diferentes estados da rede segundo Dy Liacco em [1]

O Estado Preventivo (também denominado por Estado Normal), onde o sistema se encontra em 99% do seu tempo, não é mais do que o estado normal de funcionamento. Tem por base o estabelecimento de uma lógica de segurança e, assim sendo, pretende transmitir que todas as cargas são alimentadas pelos respetivos geradores, sem qualquer violação dos limites de operação.

A descrição de seguro advém do facto de na eventualidade do aparecimento de contingências/perturbações consideradas comuns, tais como saída de linhas e/ou geradores devido a falhas de equipamento ou fenómenos naturais, o sistema ser capaz de responder sem violar qualquer um dos limites estabelecidos. Caso contrário, em que o sistema mantém invioladas as restrições mas continua vulnerável às perturbações, diz-se que se encontra inseguro. Devem então ser tomadas as ações preventivas com o intuito de se manter o sistema no estado atual.

Na eventualidade do sistema ser capaz de alimentar todas as cargas mas parte das suas restrições terem sido excedidas devido a uma perturbação inesperada, defende o autor que o sistema se encontra agora no Estado de Emergência. Aqui, é necessária a pronta intervenção do Operador, por forma a regressar ao Estado Normal, algo que pode resultar na abertura de linhas de transmissão, cargas, transformadores entre outros equipamentos.

Fortemente associado ao anterior, o Estado de Reposição pressupõe um conjunto de medidas que se pretendem rápidas e por forma a minimizar o impacto no rácio carga/geração. Anos mais tarde, mais especificamente em 1978, L. Fink e K. Carlsen mostraram em [2], que a existência de um diagrama mais completo modelizaria melhor os diferentes estados do sistema. Na Figura 2.2 é apresentado o novo diagrama.

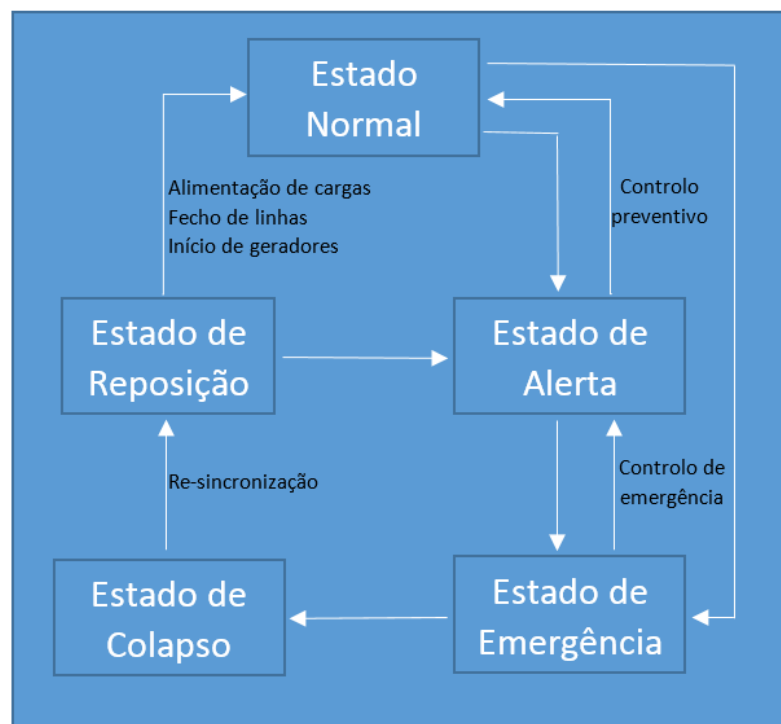


Figura 2.2: Os estados da rede segundo L. Fink e K. Carlsen em [2]

A introdução do Estado de Alerta serve de suporte ao Estado Normal, sendo que agora qualquer perturbação será resolvida no primeiro Estado referido. Adicionalmente, é ainda acrescentado o Estado de Colapso.¹ Caso as medidas efetuadas no Estado de Emergência falhem e resultem numa série de eventos sucessivos, o sistema encontra-se então no Estado referido. Defendem Fink e Carlsen, que tipicamente o sistema se dividirá em ilhas elétricas, cada uma operando à sua frequência. Conhecidos os estados típicos de um sistema elétrico, o foco desta dissertação é agora apontado ao Estado de Reposição.

Percorrendo o período desde o final dos anos 70 (início dos anos 80) até ao presente, podem-se analisar inúmeros artigos dedicados a tentar definir este tema. Contudo, é dado especial destaque nesta dissertação ao autor M. M. Adibi, não só pelo vasto currículo que apresenta na área das energias mas que também é suportado por vários artigos e estudos que permitiram que muitos outros fossem elaborados. Em [6], este último defende então que a Reposição de Serviço é um processo complexo, que deve fazer o balanceamento constante e cuidado entre diferentes objetivos, componentes, restrições e operações, sempre com o objetivo de assegurar uma reposição rápida e bem-sucedida.

O processo de Reposição de Serviço é assim complexo e delicado, pois os operadores de sistema têm não só de lidar com todos os problemas difíceis encontrados na operação quando o sistema se encontra no Estado Normal, bem como muitos outros de estabilidade, inerentes a uma rede pós-colapso. Durante a reposição, o objetivo principal e possíveis preocupações podem

¹Em [2] os autores definem este Estado como *In Extremis*

variar mediante as diferentes etapas do processo e a rede em que é executada. Os autores de [5] descrevem-nas seguidamente:

- Nos primeiros instantes do estado de *blackstart*, a estabilidade é a principal preocupação. A geração inicial é fornecida pelas unidades com a capacidade de auto arranque (*blackstart*), que normalmente são geradores de pequena dimensão ou máquinas síncronas hídricas. Durante o início desta fase da reposição, a rede encontra-se fragilizada visto que o apoio em termos de tensão ou recursos despacháveis é fortemente limitado. Assim, o operador de sistema tem poucas opções e as que possui encontram-se restringidas, apresentando assim mais um motivo de preocupação, caso seja necessária uma resposta a variações de frequência ou tensões transitórias. Estas são fundamentalmente causadas pela inicialização de geradores e energização de linhas de alta tensão, que provocam transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos. Conclui-se assim, que a rede se encontra num ponto muito volátil, podendo a qualquer momento voltar a entrar em colapso, prolongando todo o processo de reposição e fazendo o operador reavaliar as ações tomadas até então. Se tal acontecer, há ainda a elevada probabilidade das perturbações permanentes e até mais graves para alguns elementos do sistema ocorrerem.
- Ultrapassada a possibilidade de regresso a uma situação de instabilidade, a principal preocupação é agora saber qual a melhor estratégia para recuperar o sistema. Depois do auto arranque das máquinas com essa capacidade, existem agora mais opções para lidar com os problemas transitórios anteriores. Contudo, é aqui que o operador precisa de fazer uma análise crítica de quais as melhores ações a tomar. Sabendo que um S.E.E. é uma extensa e complexa rede interligada, com inúmeros equipamentos e restrições, o número de caminhos a seguir com o processo de reposição é elevado. Adicionalmente, as características de cada S.E.E., a preparação do próprio operador para responder a uma situação de colapso, as prioridades e estratégias de reposição têm ainda de ser consideradas.
- Para algumas ligações entre grandes regiões, o processo de reposição pode incluir a divisão do S.E.E. recorrendo a múltiplas ilhas elétricas, tendo como objetivo uma reposição paralela. À medida que a reposição progride, cada ilha vai adquirindo um balanço entre geração e carga. Estas serão posteriormente sincronizadas com o resto do sistema ou outra ilha. De facto, por forma a poderem sincronizar e assim fechar a linha que as liga, necessitam de ter frequências e ângulos de fase iguais. As operações típicas do Estado Normal são recomeçadas quando todo o S.E.E. se encontra interligado e todas as cargas alimentadas.

A Tabela 2.1 seguinte apresenta os principais desafios que necessitam de ser tratados e entendidos durante a fase de auto arranque e a fase da reposição.

Tabela 2.1: Principais problemas de operação na Reposição de Sistema presentes em [5]

	Fase de <i>Blackstart</i>	Fase de Reposição
Segurança transitória	<ul style="list-style-type: none"> • Transitórios eletromagnéticos das unidades de geração com capacidade de auto arranque (<i>blackstart</i>). • Resposta em frequência das unidades principais para alimentação de cargas. • Tensões transitórias. • Alteração dos limites dos equipamentos de proteção para o auto arranque das máquinas e para o próprio processo de reposição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidade dos níveis de tensão. • Compensação na energização de longas linhas de transmissão. • Momentos de sincronização de ilhas elétricas. • Efeitos decorrentes das ações efetuadas ao nível dos sistemas de proteção (<i>switching</i>).
Segurança permanente/estável	<ul style="list-style-type: none"> • Trânsito de potência ativa. • Compensação de potência reativa. • Identificação local de perturbações. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trânsito de potência ativa. • Compensação de potência reativa. • Estabilidade térmica. • Estabilidade dos níveis de tensão. • Seleção das unidades geradores e fecho específico de linhas. • Segurança do sistema.

2.1.3 Estratégias

W.A. Johnson defende em [7] que muitas estratégias de reposição são adaptáveis para diferentes tipos de *blackouts*, com o intuito de permitir a utilização de pessoal, material e equipamento mediante a severidade da perturbação. Acrescenta ainda que são planos flexíveis, ao permitirem a inclusão de novas e melhoradas atualizações. Assim sendo, defende que as estratégias devem ser revistas e revisitadas periodicamente, por forma a incorporar alterações organizacionais, práticas da indústria mais recentes bem como novos e melhorados equipamentos.

A Reposição de Serviço está dependente de inúmeros fatores, fazendo dela única para cada S.E.E.. Contudo, serão seguidamente apresentadas algumas considerações comuns entre todas, bem como as principais estratégias utilizadas por parte dos operadores. M. M. Adibi e L. H. Fink apresentam [8] duas grandes estratégias muito utilizadas: *Build-Down* e *Build-Up*.

Estratégia *Build-Down*

Conceito

Baseada numa energização inicial da rede do S.E.E. em questão, esta estratégia foca-se assim em tentar restabelecer todo o sistema de transmissão, debruçando-se seguidamente na reposição passo-a-passo de cargas e restante geração.

Estratégia

- Avaliação do estado da rede (impacto do *blackout* nas linhas), dos meios disponíveis (capacidade de *blackstart* das máquinas) e de possíveis equipamentos de armazenamento de energia.
- Energização das linhas AT e MAT, evitando sobretensões e propagação de harmónicos.
- Fornecimento de energia para o arranque das máquinas que não possuem capacidade de *blackstart*.
- Sincronização das máquinas à medida que estas vão ficando disponíveis para fornecer energia ao sistema, bem como alimentação de determinadas cargas definidas pelo Operador (usualmente, cargas prioritárias)
- Reposição completa da carga e retorno ao Estado Normal.

Consequências

O processo de energização das linhas de transmissão, tal como já foi referido, introduz uma elevada quantidade de energia reativa que tem de absorvida por cargas, máquinas ou outros equipamentos específicos. Caso contrário, provocará o aumento excessivo dos níveis de tensão do sistema (sobretensões).

Aplicação

Mais direcionada para sistemas de pequena dimensão sem longas linhas de transmissão de AT, por forma a diminuir os níveis de reativa já referidos. Sistemas predominantemente hídricos com elevada capacidade de absorção de potência reativa. Noutros sistemas, esta estratégia é usada quando existe a possibilidade de auxílio no processo inicial de energização (e consequentemente absorção de potência reativa) por parte de um sistema vizinho ou quando ocorre um *blackout* parcial. O estudo dos autores de [9] demonstra que fornecendo a energia mínima necessária ao sistema para a sua energização, contribui não só para a redução dos níveis de potência reativa no sistema provenientes das linhas de transmissão bem como a quantidade de sobretensões detetadas.

Estratégia Build-Up

Conceito

Contrariamente à estratégia anterior, esta analisa o sistema afetado e procede à divisão em subsistemas (ilhas elétricas), ocupando-se assim da reposição paralela entre os vários subsistemas

e consequente sincronização entre os vários.

Estratégia

- Avaliação do estado da rede (impacto do *blackout* nas linhas), dos meios disponíveis (capacidade de *blackstart* das máquinas) e de possíveis equipamentos de armazenamento de energia.
- Divisão do sistema em subsistemas, com o objetivo que cada um deles contenha pelo menos uma máquina com capacidade de *blackstart*.
- Fornecimento de energia para o arranque das máquinas que não possuem capacidade de *blackstart*.
- Ligação entre as várias máquinas dentro de cada subsistema mas antes da reposição total da carga.
- Sincronização entre os vários subsistemas e reposição de cargas necessárias à estabilização do sistema.
- Fecho de linhas de transmissão de interligação a sistemas vizinhos quando se encontrar adequado a receber a energia reativa produzida resultante.

Consequências

Enquanto que a Reposição de Serviço simultânea entre vários sistemas pode aparentemente reduzir a duração do *blackout*, a extensão da divisão em vários subsistemas está limitada pela disponibilidade dos recursos (número de máquinas com capacidade de *blackstart*), incluindo o número de equipas de operação bem como de comunicações disponíveis para permitirem uma coordenação eficaz entre ambos.

Aplicação

Aplica-se a redes de grandes dimensões com (ou sem) extensas linhas de transmissão de AT e a sistemas que tenham sofrido um colapso total.

Estratégia Hierárquica

Os autores de [3] apresentam uma estratégia de reposição baseada num sistema hierárquico, cujo objetivo principal é a reposição de serviço através da maximização do MWh fornecido ao consumidor, mantendo sempre os limites das condições de operação. Observam então que o processo de reposição adquire informação sobre os níveis imediatamente inferiores, tal como se sucede com os seguintes. Analisando a Figura 2.3, os campos seguidamente apresentados fornecem diretamente dados para a reposição e recebem informação de outros parâmetros:

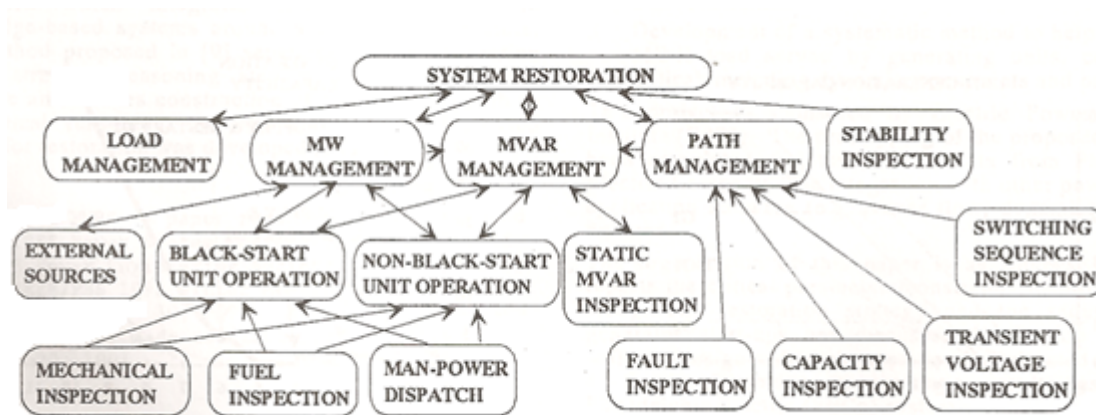


Figura 2.3: Estratégia de Reposição segundo [3]

Gestão de Potência Ativa (*MW Management*)

Responsável por fazer uma gestão otimizada dos recursos (máquinas) disponíveis e por coordenar a sequência de ativação das restantes. Após um *blackout* total ou parcial, as máquinas com capacidade de auto arranque (*blackstart*) devem ser ligadas o mais rapidamente possível. Por sua vez, as unidades que não possuem essa particularidade devem ser ordenadas de acordo com o seu tempo de arranque. Assim, a energia deve chegar primeiro à máquina cujo tempo de arranque seja maior. Liu [3], ao incluir o campo *External Sources* (Recursos Externos) possibilita a hipótese de a rede/sistema em questão poder receber energia duma rede vizinha, ajudando assim o processo de reposição.

Gestão de Potência Reativa (*Mvar Management*)

Também encarregue de coordenar a sequência das máquinas que possuem ou não capacidade de *blackstart*, está contudo mais focado na análise e gestão dos níveis de potência reativa no sistema de transmissão. Tal como já foi anteriormente referido neste documento, o fecho de linhas de transmissão irá gerar uma quantidade de potência reativa que as máquinas terão de absorver. A gestão torna-se assim complexa e um problema de cálculo até, dado que a capacidade máxima de absorção de reativa de cada máquina pode ser calculada em função da curva de capacidade do mesmo.

Análise da estratégia (*Path Management*)

Tem como função analisar o estado da estratégia adotada e, se nenhum dos limites de operação do sistema são violados, nomeadamente de capacidade de linhas e transitórios provenientes do fecho de linhas. O “caminho” mais curto, ou seja, aquele que requiere o menor número de ações, possibilitando ligação entre a geração e a carga, é preferível a não ser que não seja exequível.

Gestão de carga (*Load Management*)

Dependendo das prioridades definidas pelo Operador, o restauro de cargas pode assumir

duas funções:

1. Servir de auxílio ao processo de reposição através da contribuição da absorção de reativa produzida pelas linhas de transmissão com o objetivo de manter os limites de tensão inviolados.
2. Alimentar consumidores.

Controlo de Frequência (*Stability Inspection*)

Responsável pelo controlo de frequência do sistema e, naturalmente, fortemente ligado com anteriores módulos referidos.

Por fim, é também apresentado um método de auxílio a estratégias propostas pelo Operador, tendo contudo esta ferramenta, a hipótese de as propor também.

T. Kostić propõe em [10] uma ferramenta de apoio às decisões a serem tomadas pelo Operador durante o processo de Reposição de Serviço (DAFOOR). Focada especialmente no apoio em tempo real, as principais características desta função são:

- Possibilidade de utilização num ambiente real. Tem a capacidade de ter em consideração a evolução dinâmica do Estado da rede, devido a uma ação de controlo ou evento imprevisto. Isto implica uma fácil ligação com o simulador do sistema para validação de hipóteses, fácil implementação num centro de controlo para interação em tempo real e ajustamento às práticas dos Operadores.
- Modo interativo, que permite ao utilizador efetuar as suas próprias hipóteses, associado a uma função instrutiva. Isto implica que exista uma capacidade para que cada ação que tenha sido validada e comprovado que não viola quaisquer restrições de operação do sistema, seja sugerida ao, ou pelo Operador. É ainda necessário explicar todos os resultados produzidos, bem como lidar com a situação inicial, podendo esta ser uma perturbação total ou parcial.

O DAFOOR (“Decision Aid Function For Restoration”) assenta então em dois blocos. O Bloco de Análise, que tem como função auxiliar o Operador durante o processo de Reposição, nunca esquecendo o comportamento dinâmico e em tempo real do S.E.E. Por seu lado, este comportamento é analisado pelo segundo e último bloco, Bloco de Atualização em Tempo Real. Tem como objetivo gerar um conjunto de informações capazes de representar o S.E.E. a qualquer momento. Uma das fontes a que este bloco recorre para identificar eventos imprevistos, é a simulação esperada do estado do sistema, resultante de uma ação proposta pelo primeiro bloco.

2.1.4 Problemas associados

O papel do Operador de Sistema é fulcral durante toda a Reposição de Serviço, não só para avaliar continuamente o estado do sistema, bem como para tomar as necessárias ações, por forma a garantir os requisitos necessários inerentes a este processo. Defende M. M. Adibi em [11] que

o treino de operadores em técnicas de reposição é de elevada prioridade, tendo em conta que a ocorrência de tais cenários que requeiram todos estes mecanismos é rara e, assim sendo, deve ser usada como experiência de aprendizagem. Juntamente com R. J. Kafka, publicou um artigo onde enunciou os principais problemas que ocorrem durante este processo e que foram agrupados e são apresentados seguidamente.

A) Considerações sobre Potência

Considerando inicialmente a energia reativa, é necessária uma gestão otimizada desta no sistema, por forma a evitar sobretensões e tensões transitórias (p.e., no fecho de linhas de transmissão, tal como já referido neste documento). Fortemente associada, a frequência do sistema tem também de ser analisada durante o processo, mantendo sempre os níveis recomendados. Tal pode ser controlado através do rácio entre energia ativa gerada/consumida.

B) Considerações sobre equipamentos

Analisar as máquinas que apresentam as melhores respostas a fortes desníveis de frequência através da análise dos seus controladores e priorizar a sua entrada no sistema em conformidade. Paralelamente, as unidades com capacidade de *blackstart* devem ser introduzidas assim que estiverem operacionais, por forma a fornecer a energia de arranque às restantes que não possuem tal propriedade.

Na presença de uma situação que envolva ilhas elétricas, defendem os autores que deve ser dada especial atenção aos ângulos de carga dos geradores das diferentes ilhas, pois só podem ser interligadas quando estes forem iguais. Caso contrário, ocorrerá uma variação na frequência, que se for inferior ao limite mínimo estabelecido, pode voltar a colocar o sistema numa situação de colapso.

Por fim, a procura do local onde ocorreu o defeito que deu origem ao colapso do sistema é mais um objetivo importante a cumprir com o intuito de se saber qual a área que necessitará de intervenção. Paralelamente a esta situação, a atuação nos disjuntores existentes nas linhas bem como dos relés de mínimo de frequência devem também ser analisadas, pois apesar de reduzirem o tempo de reposição, fazendo dum processo por si já complexo, ainda mais difícil. A morosidade inerente ao processo de escolha dos relés deve então ser considerada, podendo ser eliminada pela escolha de relés adaptativos.

C) Considerações sobre o sistema

Perante a existência de ilhas elétricas, intencionais ou não, é necessário analisar a metodologia de reposição utilizada. Caso estas tenham capacidade de se reporem, auxiliando assim o processo, devem ser consideradas e também pelo facto de aumentarem a rapidez de reposição.

A interrupção local da alimentação de consumidores é uma estratégia que os autores consideram útil, na medida em que ajuda a preservar o funcionamento do sistema elétrico e seus componentes mas que acarreta as suas consequências. Caso o balanço entre geração/consumo não seja bem avaliado, poderá causar o sistema a regressar ao Estado de Colapso.

2.2 Ilhas Elétricas

O crescente aumento da PD nos S.E.E. um pouco por todo o mundo, tem motivado a comunidade científica envolvida nesta área a aprofundar a investigação sobre este assunto. Em tal procura de conhecimento, distingue-se um vasto conjunto de artigos que pretendem mostrar que a integração de PD nas redes pode não só ser benéfica em termos de controlo de tensão e frequência [[12], [13], [14]] mas também auxiliar a continuidade de serviço pós-perturbação, através do funcionamento em redes isoladas (ilhas elétricas) [[15], [16]]. São seguidamente apresentadas algumas considerações sobre cada um destes três campos influenciados pela PD:

Regulação de Tensão

A PD, atuando em conjunto com sistemas de regulação de tensão, pode contribuir para o seu controlo. Em [[17],[18]] é dada uma explicação sumária de como a regulação de tensão é feita sem recurso a PD e de como esta pode ter uma influência negativa se não for acompanhada por sistema de regulação. A atuação nos níveis de tensão é muitas vezes efetuada através da variação do valor das tomadas dos transformadores presentes na rede de distribuição. Esta atuação é feita pela medição da corrente aos seus terminais em conjunto com uma impedância que simula a linha até ao ponto onde se pretende atuar. Ora, a PD, ao injetar potência ao longo do ramo, fará com que o transformador atue nas suas tomadas para compensar o “virtual” aumento de tensão. É assim reforçada a ideia de que a PD é útil quando acompanhada pelos respetivos sistemas de regulação de tensão.

Regulação de Frequência

A contribuição da PD para o controlo de frequência acontece com o objetivo de reduzir os elevados níveis de reserva girante nas grandes centrais dos S.E.E's. Através da diminuição deste valor, reduzem-se custos de operação pois já não é necessária tão elevada reserva para produção de potência em caso de perturbação ou necessidade. [[8]]

Os autores de [19] defendem que o aumento da penetração de geração eólica terá um impacto cada vez mais distinto no controlo de frequência dos S.E.Es.. Se, por um lado, a produção eólica ajudará na redução da intervenção de máquinas síncronas de energia não renovável, por outro é crescente o número de estudos que revela que a relação entre a energia cinética total armazenada e potência total produzida por sistemas eólicos revela um comportamento não linear. Acabam por concluir que este é um campo que necessita de uma maior investigação mas que é executável, ou seja, que a geração eólica pode contribuir para o controlo da regulação de frequência.

Ilhas Elétricas

Uma ilha elétrica consiste numa parte de um S.E.E. que se encontra alimentada mas eletricamente isolada do resto do sistema. Inicialmente vistas como um forte inconveniente como consequência da integração de PD nas redes, é crescente a publicação de estudos que utilizam PD como auxílio para uma situação de Reposição de Serviço pós-colapso ou perturbação [20]. Existem dois tipos de ilhas elétricas: intencionais e espontâneas. As primeiras

são criadas pelo Operador, através de manobras nos sistemas de transmissão e equipamentos de proteção das redes. Já as ilhas elétricas espontâneas, tal como o próprio nome indica, não são programadas, ocorrem no seguimento de uma perturbação.

Tal como referido anteriormente, a existência destas ilhas nem sempre foi observada com um interesse positivo, tendo então sido desenvolvidos métodos para a sua deteção e eventual eliminação. Contudo, muitos destes mesmos métodos são agora usados no auxílio de uma eventual estratégia de reposição. Existem então dois tipos de métodos:

Métodos de Deteção Passivos

Em [21], os autores referem que estes métodos têm uma grande zona em que não são capazes de detetar a existência ou não de uma ilha elétrica. Através da medição de parâmetros como a tensão e frequência, apresentam-se como a deteção mais simples existente.

Métodos de Deteção Ativos

Desenvolvidos para atuarem em conjunto com os anteriores, diminuem as zonas que os métodos passivos não são capazes de detetar. Contudo, fazem-no apresentando uma qualidade de serviço menor.

2.2.1 Capacidade de *Blackstart*

Os autores de [4] referem que a capacidade de auto arranque de um dado S.E.E. é a diferença entre o somatório da quantidade total de potência ativa passível de ser gerada (MW) e os requisitos de inicialização necessários. Após um *blackout*, várias unidades de geração precisam de energia para o seu arranque. Algumas podem ainda estar limitadas por restrições de tempo que, caso não sejam cumpridas, conduzem a um maior tempo fora de serviço até que possa ser restabelecida sincronização com a rede. É importante que durante o processo de reposição a geração seja maximizada. Assim, e considerando que os recursos limitados de auto arranque, conjuntamente com as várias restrições do sistema sobre algumas unidades de geração, comprometem o tempo do processo de reposição, a geração máxima disponível pode ser determinada pela estratégia otimizada de inicialização de todas as unidades.

Vários artigos foram publicados sobre as diferentes estratégias que podem ser escolhidas para o processo de Reposição do Sistema. Em [22] os autores propõem a maximização da capacidade de geração do sistema enquanto que em [23] a minimização da energia que não é consumida. Já Liu em [24] propõe a maximização parcial ou mesmo total das cargas alimentadas durante o processo de reposição e não no final e Feltes a minimização do tempo total da reposição de serviço em [25]. Contudo, existem certas dificuldades na aplicação desta capacidade. Destacam-se aqui os trabalhos de Adibi e Sun em [21] e [26], respetivamente.

O Método do Caminho Crítico, torna-se problemático ao necessitar da sequência otimizada de ações do processo de reposição. Sabendo que estas diferem para cada S.E.E., torna-se assim um entrave a escolha da implementação da capacidade de auto arranque [21]. Já a Estratégia de

Inicialização com recurso a uma abordagem MILP, a dificuldade encontra-se no pouco desenvolvimento e coordenação da verificação das restrições do sistema, necessárias para a determinação da capacidade de geração total [26].

Um objetivo do processo de reposição de serviço é restabelecer a ligação do máximo de cargas, no menor tempo possível. Depois da instalação de unidades de geração adicionais com capacidade de auto arranque, a redução do tempo de reposição pode ser conseguida através da atualização da estratégia definida. Mediante as características das máquinas e da sua localização, esta mudança conduzirá naturalmente a diferentes tempos. Assim, o valor das novas capacidades será avaliado pela maior ou menor redução do período que o processo de Reposição de Serviço demorar. Contudo, critérios financeiros também são uma variável a considerar. O tempo total reduzido e o custo da implementação desta capacidade definirão a estratégia a implementar, tal como se pode observar na Figura 2.4 apresentada a seguir:

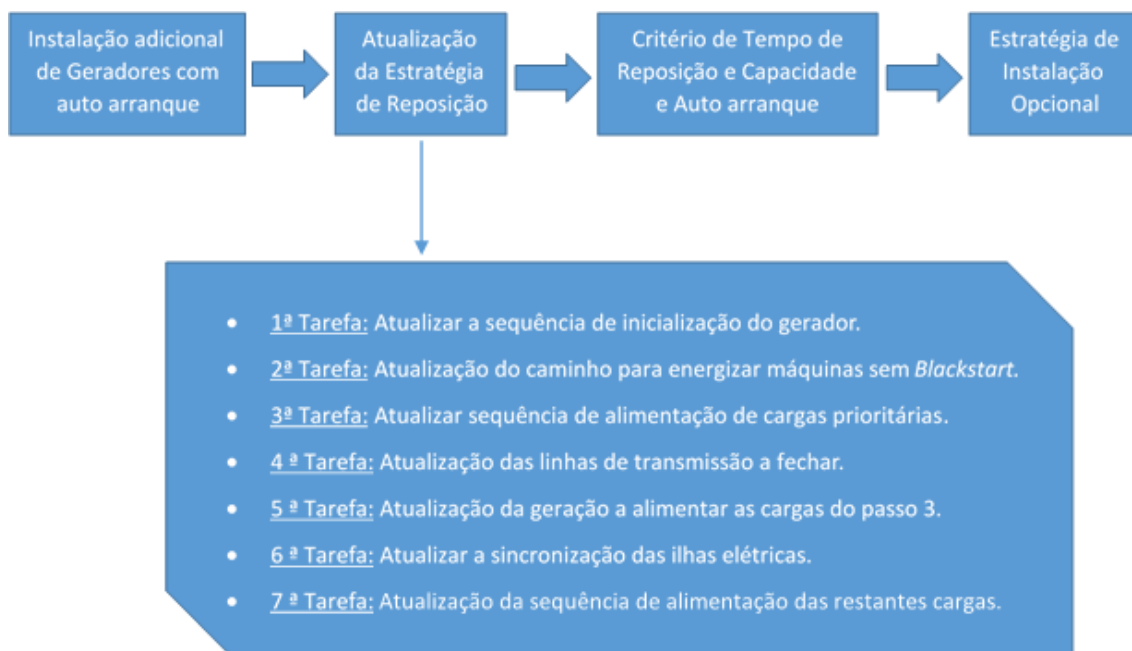


Figura 2.4: Plano de Reposição com capacidade de *Blackstart* segundo [4].

Estes dois critérios fornecem assim informação do benefício que teriam no processo de reposição, baseado no custo da instalação. É então da responsabilidade do operador ou da entidade que detém o controlo da gestão do S.E.E. a verificação da utilidade de instalar esta capacidade e, em caso afirmativo, determinar o local que proporcionaria a melhor estratégia de reposição.

Capítulo 3

Plataforma de simulação e Modelização do Sistema

3.1 Introdução

A operação de sistemas elétricos de energia torna-se crescentemente mais complexa. As decisões estão cada vez mais dependentes de múltiplos fatores devido a um maior número de ligações (entre redes), à complexidade dos equipamentos e às crescentes restrições económicas, ambientais, de qualidade de serviço e de segurança do sistema. Ora, se adicionalmente o sistema que se pretende estudar se encontrar numa situação de pós-colapso, necessitando portanto de uma estratégia otimizada de reposição do serviço, é fulcral um conhecimento detalhado de todos os elementos presentes na rede e da sua disponibilidade para entrar em funcionamento.

Como já anteriormente referido, a reposição de serviço é um problema complexo e multiobjectivo, dado que o processo implica o cumprimento de várias metas como a maximização da quantidade de carga reposta e o cumprimento durante a reposição das restrições da rede e dos seus componentes, bem como a minimização do tempo total.

Dependente então de muitas variáveis, obriga assim que para o seu estudo, simulação e melhor compreensão do impacto que tem num S.E.E., são necessários vários requisitos fundamentais. Sabendo então que o nível de precisão de um estudo baseado em simulação e respetivas conclusões está intrinsecamente dependente da qualidade dos modelos utilizados e da robustez da plataforma de simulação, foi escolhida uma que permitisse atingir o patamar de qualidade de resultados requerido. Patamar este, que se quer o mais próximo possível de uma situação real. Assim, o programa selecionado, para além de um vasto leque de opções, deveria fundamentalmente não só permitir a representação das consequências de determinadas ações tomadas pelo utilizador com um grau muito próximo da realidade bem como permitir a introdução de elementos com características tais que simulem o seu comportamento perante vários cenários. A plataforma de simulação EUROS-TAG apresenta-se assim como a candidata ideal para este fim por disponibilizar ao utilizador todos modelos necessários que um Operador precisa na realidade mediante uma situação de reposição de serviço.

O EUROSTAG é um programa largamente utilizado por Operadores de Sistemas de Transmissão e empresas na área da energia, que permite o estudo, investigação, desenho e otimização operacional de redes elétricas de energia [27]. As características desta plataforma serão posteriormente detalhadas neste capítulo, bem como os seus principais menus e propriedades que auxiliaram o desenvolvimento das redes elétricas construídas.

É também apresentada a implementação dos elementos constituintes das redes elétricas criadas no EUROSTAG. Com o grau de especificidade já referido, a descrição das características das linhas, dos transformadores, das unidades de geração e, por fim, das cargas é explicada e demonstrada a sua aplicação.

Por fim, é ainda importante salientar neste período introdutório a organização escolhida para apresentar o subcapítulo "Unidades de Geração". Neste, são abordadas não só as máquinas síncronas e respetivos modelos reguladores bem como os modelos implementados para simular um sistema de produção eólico. A aglomeração das características físicas das máquinas juntamente com os modelos de controlo de regulação de tensão, velocidade e excitação pretende proporcionar ao leitor um melhor entendimento de como uma unidade de geração é introduzida e simulada no EUROSTAG. O mesmo ocorre para o sistema eólico produtor.

3.2 EUROSTAG

A plataforma de simulação escolhida foi então o EUROSTAG. Desenvolvido inicialmente em 1988 pela empresa Tractebel, a ideia da criação de um programa que fosse capaz de analisar a dinâmica de um S.E.E. surgiu anos antes, após o *blackout* em 1982 na Bélgica. Mediante o sucesso do programa e prevendo o crescimento das suas potencialidades, a EDF (*Électricité de France*) juntou-se ao projeto em 1989. As últimas atualizações/versões do programa, incluindo a versão utilizada nesta dissertação são, contudo, da autoria da parceria criada entre a Tractabel e a RTE (*Réseau de Transport d'Électricité*).

Qualquer que seja o tipo de perturbação observada (com exceção de transitórios eletromagnéticos) ou a dimensão do sistema, o programa simula o comportamento do S.E.E. até este voltar ao Estado Normal. O algoritmo usado no EUROSTAG corre um controlo automático da simulação que é ajustado por critérios definidos pelo utilizador. É então possível recolher durante todo o processo resultados e reações do sistema perante perturbações, intencionais ou não causadas pelo utilizador.

Sendo uma ferramenta com tão vasto potencial, o EUROSTAG proporciona um leque bastante diversificado de possíveis estudos. Destacam-se os estudos de grandes S.E.E. durante longos períodos de tempo, a obtenção de tempos críticos de atuação das proteções, estratégias de deslastre de cargas, manipulação da entrada e/ou saída de unidades de geração e avaliação de variações de potência. A análise do comportamento de uma dada rede elétrica após um "black out" total, situação em estudo nesta dissertação, é então possível de ser realizada na plataforma em foco.

Sendo o modelo dinâmico do sistema descrito por equações de estado, o EUROSTAG utiliza um algoritmo de integração numérica para as resolver. Mediante a lista de eventos criada pelo

utilizador, o aumento ou diminuição do passo de integração está diretamente relacionado com o peso computacional do processo. Desta forma, garante-se uma igualdade de resultados, independentemente do tempo total dos eventos, das características do S.E.E. desenvolvido e dos seus constituintes (máquinas, linhas, cargas, transformadores, etc.).

Um dos objetivos desta dissertação foi o estudo de uma sequência de eventos que conduzissem a uma rápida e otimizada reposição de serviço. Tal foi possível através do menu “File Editor”, onde são definidos os eventos. Estes são incidentes, operações e ordens de processo que acontecem durante a simulação. Podem ser programados ou gerados pelo EUROSTAG quando um dispositivo automático é acionado ou introduzido durante a simulação. A lista seguidamente apresentada dispõe os eventos mais típicos que podem ser criados:

- Curto-circuitos;
- Fecho de linhas;
- Inicialização de Geradores;
- Alteração dos níveis de potência ativa e reativa nas cargas;
- Modificação dos níveis nos controladores.

O *software* do EUROSTAG é bastante intuitivo e permite desenhar novos modelos gráficos de controlo de máquinas. Na verdade, uma das principais características diferenciadoras do programa reside nos modelos utilizados para simular um dado S.E.E.. Dispondo o utilizador de uma vasta biblioteca com modelos de controlo, o EUROSTAG fornece ainda a possibilidade de ser o próprio a criar esses modelos, definindo assim o nível de especificidade pretendido. Oferece também ajudas interativas gráficas para posterior análise de resultados e apresentações. Esta modelização é bastante usada para definir:

- Os modelos de controlo reguladores de tensão, frequência, excitação de máquinas;
- Os modelos mais comuns presentes nas bibliotecas do IEEE;
- O comportamento das turbinas eólicas e de outros modelos de Produção Dispersa;
- Modelos de linhas DC, SVC, cargas especiais, entre outros.

Toda esta implementação é efetuada num dos principais menus da interface inicial do programa, presente na Figura 3.1, denominado *Model Editor*.

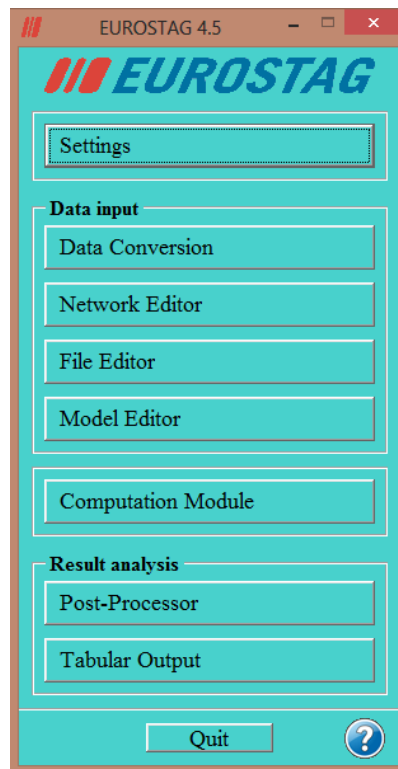


Figura 3.1: Menu principal do EUROSTAG

Segundo os criadores, os modelos criados pelo utilizador ou disponíveis na biblioteca já referida, são apelidados de macroblocos (tradução literal do termo anglo-saxónico *Macroblocks*). Estes são construídos utilizando um conjunto de blocos simples e elementares que incluem funções algébricas, trigonométricas, de medida e de Laplace. Cada modelo inclui também um esquema principal e um esquema de inicialização. A distinção, necessária, entre estes dois advém da escolha do utilizador, ou seja, este último decide em que estado se iniciará o modelo. O objetivo do esquema de inicialização é permitir que o arranque do processo de simulação parta de uma situação de equilíbrio [18].

Os autores de [28] dividem o processo do EUROSTAG em três grandes áreas: Preparação de Dados, Simulação e Análise de Resultados. São em seguida descritos os principais campos do menu principal e que se integram nos campos referidos:

- O *Data Conversion*, tal como o próprio nome indica, permite estabelecer a ponte entre este *software* e outros. Ao disponibilizar uma opção de exportação para diferentes formatos, o EUROSTAG torna-se assim numa ferramenta mais global para o Operador/utilizador.
- O *Network Editor* é descrito em [27] como sendo flexível e de fácil utilização ao permitir uma visualização gráfica dos modelos/redes construídos pelo utilizador, evitando assim longas linhas de código. Neste campo é ainda possível estudar o trânsito de potências do sistema em questão.

- O *File Editor*, já referido, permite alterar as áreas respeitantes às características da própria rede (como definição de zonas de tensão e barramentos de referência), dos equipamentos constituintes da mesma (máquinas, linhas, cargas, transformadores) e, por fim, a sequência de eventos.
- Utilizando o método de Newton-Raphson para a resolução dos sistemas de equações não lineares que determina o estado inicial do sistema e um método de predição-correção baseado no formalismo de *Nordsieck* para a simulação numérica das equações diferenciais, o campo *Computation Module* executa uma simulação da sequência de eventos introduzida.
- Por fim, já parte de análise de resultados, o *Post-Processor* permite ao utilizador visualizar de graficamente inúmeros parâmetros relativos aos barramentos, máquinas, injeções e ramos. Já o *Tabular Output* oferece uma visualização mais seletiva, na medida em que podem ser criadas tabelas e curvas de acordo com os dados produzidos, sendo a informação presente nas últimas definida pelo utilizador.

3.3 O Sistema no EUROSTAG

Neste subcapítulo serão abordados os vários elementos constituintes do sistema elétrico desenvolvido, tendo sempre, como já referido, o objetivo de aproximar o mais possível os equipamentos e características presentes à realidade. Adicionalmente, são também apresentados os modelos de controlo utilizados para simular as capacidades presentes nas unidades de geração do sistema, isto é, nas máquinas síncronas e sistema produtor eólico. Assim, as primeiras foram dotadas de modelos cuja função é preservar e melhorar a estabilidade do S.E.E., nomeadamente de tensão, frequência e de excitação. Já no caso da geração eólica, é apresentado um modelo cuja função é simular o comportamento de um dado sistema produtor eólico, também nas respostas a variações de tensão e frequência.

3.3.1 Linhas

Na representação das linhas optou-se pelo modelo unifilar em PI, o que permite não só assumir que a carga se encontra igualmente distribuída pelas três fases como também que as características da linha se podem descrever num circuito monofásico equivalente.[28]

O cálculo dos valores utilizados em cada linha será posteriormente apresentado em [4]. As últimas são então constituídas por uma resistência R e uma reactância X do condutor elétrico e uma susceptância, dividida em susceptâncias *shunt*. A Figura 3.2, presente em [29], representa o esquema utilizado.

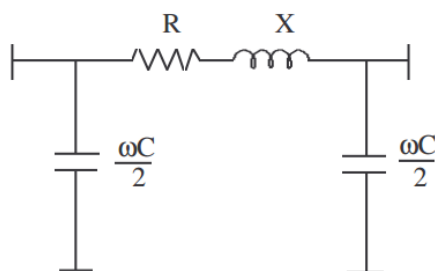


Figura 3.2: Modelo equivalente em Pi

3.3.2 Transformadores

O programa EUROSTAG em [28] apresenta ao utilizador quatro tipos possíveis de transformadores de duplo enrolamento:

- Transformador simplificado de razão real fixa;
- Transformador simplificado de razão real variável;
- Transformador simplificado de razão imaginária fixa;
- Transformador simplificado de razão imaginária variável.

Em todos os casos de estudo, ie nas redes elétricas criadas, foram utilizados transformadores simplificados de razão fixa, cujas características são as análogas às presentes em [29] e que serão apresentadas posteriormente no Capítulo 4. Na figura seguinte, retirada de [29] é possível observar o esquema simplificado do transformador.

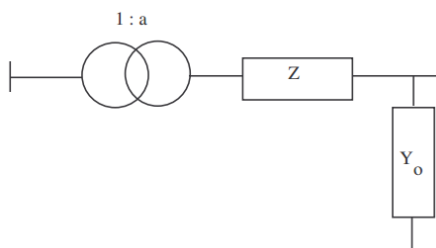


Figura 3.3: Modelo do transformador simplificado de razão real fixa

3.3.3 Unidades de Geração

Nesta secção serão abordadas as várias características que compõem não só as máquinas síncronas utilizadas nos casos de estudo bem como as propriedades e modelização de aerogeradores.

Relativamente às primeiras, foram representadas por um modelo de quarta ordem seguindo as equações de Park [[29] e [30]], sendo que o primeiro se divide em dois sub-modelos: Modelo completo ou Modelo simplificado.

Nos casos de estudo considerados, optou-se pelo modelo simplificado pois permite a representação do enrolamento pela componente direta. Em [28] são apresentadas as duas formas possíveis que o EUROSTAG aceita como entradas para definir os parâmetros elétricos das máquinas:

- Por parâmetros internos, como fugas, indutâncias mútuas e resistências de enrolamentos equivalente ao modelo de Park.
- Por parâmetros externos, como reatâncias e constantes de tempo associadas.

Mediante o objetivo, nível de especificidade e características pretendidas, considerou-se que a definição das máquinas por parâmetros externos seria a melhor opção. Dos últimos citados, são seguidamente dispostos, os necessários e pedidos pelo EUROSTAG. A interface que expõe o menu onde esses mesmos dados são introduzidos pode ser observado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Características de uma máquina síncrona implementadas no EUROSTAG

- x_i : reactância de fugas do estator (p.u.).
- r_a : Resistência do circuito estatórico (p.u.).
- x_d : Reactância segundo a componente direta do eixo (p.u.).
- x'_d : Reactância transitória segundo a componente direta do eixo (p.u.).
- x''_d : Reactância sub-transitória segundo a componente direta do eixo (p.u.).

- $T'd_0$: Constante de tempo transitória em circuito aberto segundo a componente direta do eixo (s).
- $T''d_0$: Constante de tempo sub-transitória em circuito aberto segundo a componente direta do eixo (s).
- T_x : Constante de tempo de amortecimento (s).
- x_q : Reactância segundo a componente em quadratura do eixo (p.u.).
- x'_q : Reactância transitória segundo a componente em quadratura do eixo (p.u.).
- x''_d : Reactância sub-transitória segundo a componente em quadratura do eixo (p.u.).
- $T'q_0$: Constante de tempo transitória em circuito aberto segundo a componente em quadratura do eixo (s).
- $T''q_0$: Constante de tempo sub-transitória em circuito aberto segundo a componente em quadratura do eixo (s).
- H : Constante de inércia da máquina (MJ/MVA).
- D : Coeficiente de amortecimento da máquina.

Relativamente aos modelos de controlo utilizados nas Máquinas Síncronas, foram implementados os seguintes:

A) Modelo dos Reguladores de Tensão das Máquinas Síncronas

Necessários para contribuírem não só para a regulação dos níveis de tensão mas também para a própria estabilidade do sistema, a introdução de modelos reguladores de tensão torna-se um requisito fundamental na simulação que se pretende efetuar. Através da introdução de uma corrente no campo de excitação do gerador, atua na tensão aos terminais do mesmo, provocando uma variação na potência reativa gerada ou absorvida pelo gerador. Para além do objetivo principal, deve atuar de forma rápida por forma a responder em conformidade com as diversas eventualidades que possam surgir. Assim sendo, foi escolhido um modelo recomendado pelo IEEE para sistemas de excitação: o modelo de excitação do tipo DC1A [31].

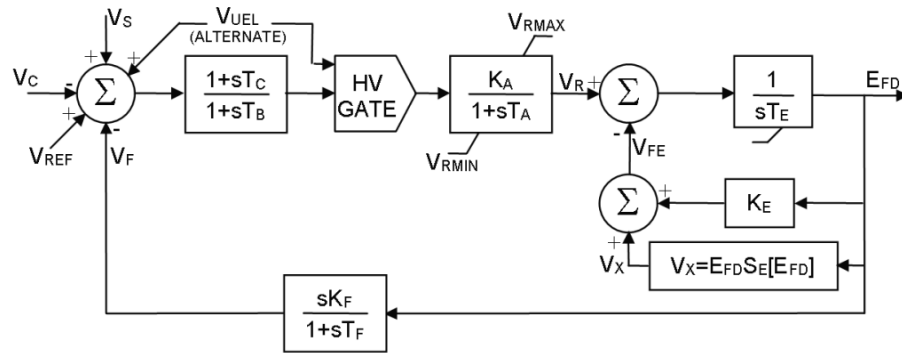


Figura 3.5: Diagrama de blocos do modelo DC1A

Sendo que:

- KA: Ganho do regulador de tensão.
- TA;TB;TC: Constante de tempo do regulador.
- KE: Constante da excitatriz.
- TE: Constante de tempo da excitatriz.
- KF: Ganho do controlo de estabilização da excitatriz.
- TF: Constante de tempo controlo de estabilização da excitatriz.
- EFD: Valor de saída da excitatriz.
- SE[EFD]: Função de saturação da excitatriz.
- VRMAX;VRMIN: Valor máximo e mínimo do regulador de tensão.
- Vref: Tensão de referência do regulador de tensão.
- Vs: Tensão do PSS (Power System Stabilizer).
- Vc: Tensão terminal dos componentes de compensação de carga.
- Vuel: Tensão de saída do limitador de sub-excitação.

A transição deste modelo para o EUROSTAG não foi necessária isto porque já fazia parte integrante da biblioteca anteriormente referida providenciada pelo programa. É ainda de referir que a função de saturação da excitatriz foi ignorada neste trabalho. São seguidamente apresentados dois macroblocos. A Figura 3.6 corresponde ao esquema de inicialização e a segunda ao esquema principal.

Desenvolvido por [32], este modelo simula a atuação dos reguladores nas válvulas de admissão de combustível, provocando assim uma reação em cadeia: altera a potência mecânica transmitida ao gerador, que irá variar a injeção de potência ativa na rede com o intuito de compensar o desequilíbrio criado pelas variações do consumo.

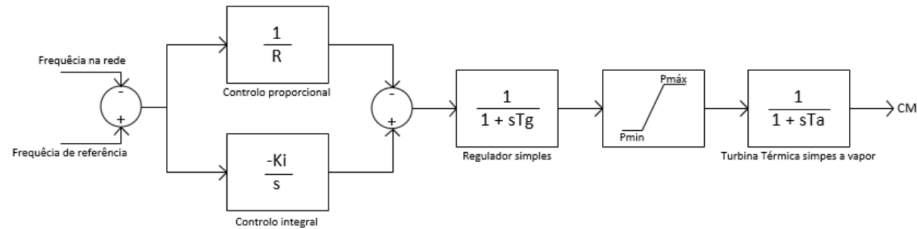


Figura 3.8: Diagrama de blocos do modelo Gover

São agora descritas as variáveis presentes no esquema da Figura 3.8, sendo que as constantes de tempo de encontram em segundos e as outras no sistema p.u.:

- O estatismo, representado pela letra R;
- A constante de ganho integral, Ki;
- A constante de tempo do regulador, Tg;
- A constante de tempo da turbina, Ta;

Seguidamente é apresentada a implementação gráfica deste modelo no EUROSTAG. Na Figura 3.9 observa-se o esquema de inicialização e na Figura 3.10 o principal.

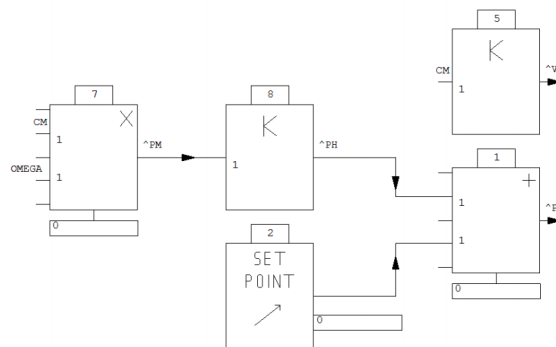


Figura 3.9: Esquema de inicialização do modelo Gover

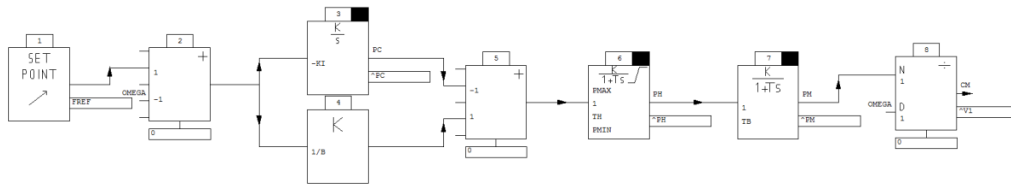


Figura 3.10: Esquema principal do modelo Gover

C) Modelo Limitador de sub-excitação das Máquinas Síncronas

Também recomendado pelo IEEE em [31] e mais uma vez presente na biblioteca de modelos do EUROSTAG, este controlador adicional tem como principal função a prevenção da redução do nível de excitação para um estado tal que coloque em questão a estabilidade da máquina síncrona. A perda de sincronismo com a rede, o sobreaquecimento do estator e atuação do sistema de proteção da máquina (relés) são outras características que este modelo possui e tenta evitar.

Os parâmetros de entrada deste modelo podem ser a junção de duas grandezas da máquina síncrona:

- A corrente e a tensão, que assim criam um modelo com características limitativas circular;
- A potência ativa e reativa, que criam o modelo (que será usado nesta dissertação) com características limitativas por linha reta ou multissegmento.

O seguinte gráfico, permite entender melhor o funcionamento desta característica. Observa-se que à medida que a potência ativa aumenta, há uma diminuição da componente reativa.

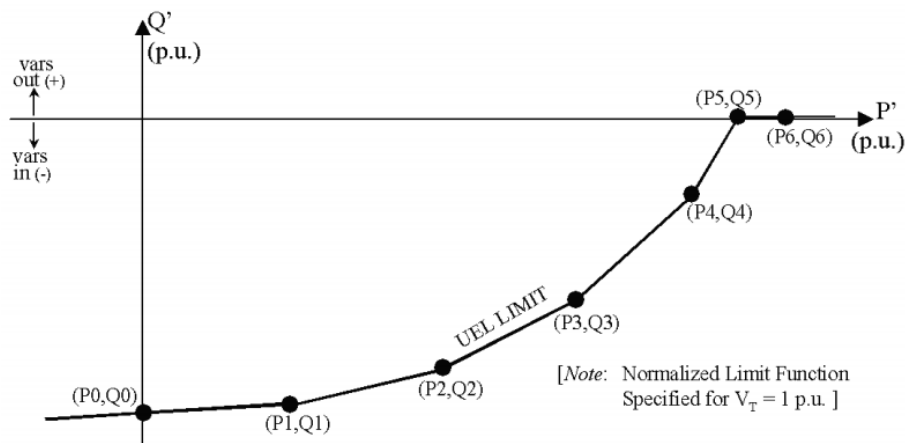


Figura 3.11: Característica limitativa do modelo UEL2

Os pontos foram definidos, para todas as máquinas implementadas, da seguinte forma:

- P0,Q0 corresponde a 0 p.u. de Potência ativa e -0,31 de reativa;
- P1,Q1 corresponde a 0,3 p.u. de Potência ativa e -0,31 de reativa;
- P2,Q2 corresponde a 0,6 p.u. de Potência ativa e -0,3 de reativa;
- P3,Q3 corresponde a 0,9 p.u. de Potência ativa e -0,21 de reativa;
- P4,Q4 corresponde a 1 p.u. de Potência ativa e -0,02 de reativa;

Assim, foi introduzido o modelo UEL2. É ainda de referir que, como este modelo está associado ao controlo da máquina, tal como o DC1A, decidiu-se juntá-los num só macrobloco, criando assim o UEL3. A ponte entre ambos ocorre através da variável de saída Vuel do UEL2 que é de entrada no modelo DC1A.

Por fim, as últimas unidades de geração consideradas foram os aerogeradores. As equações do aerogerador foram ignoradas e foram representadas pelas malhas de controlo ativa e reativa apresentadas a seguir.

Assumindo que nos sistemas de produção eólicos considerados existem geradores síncronos de ímanes permanentes com velocidade variável e conversor integral, foram necessários alguns conceitos fundamentais para uma melhor modelização destes equipamentos:

- Os aerogeradores possuem uma capacidade de absorção e de injeção de potência reativa de 30% da potência nominal instalada.
- Estão equipados com capacidade de participar no controlo de frequência através de controlador proporcional, associado a um *de-load* dos aerogeradores utilizando um *droop*. Este permite uma resposta com injeção de potência ativa proporcional às variações de frequência do sistema, auxiliando assim o processo de normalização da rede.
- Também recorrendo à potência ativa, possuem controlo de *pitch*, o que permite reduzir o ângulo de ataque das pás, através do qual se consegue um *de-load* prévio, que se descreve a seguir.
- A característica de *deloading* permite a criação de uma reserva de potência ativa nos sistemas eólicos. Tal situação é necessária para que na eventualidade da necessidade de um aumento de potência ativa injetada por parte do sistema produtor eólico, os aerogeradores possam corresponder. No fundo, limita-se a produção máxima com o objetivo de existir uma reserva para fazer face a perturbações que envolvam a atuação na frequência do sistema. A margem máxima considerada foi de 10% da potência total passível de ser gerada [32].

A figura representada permite entender melhor o fenómeno descrito, mostrando ambas as curvas com e sem aplicação de *deloading*.

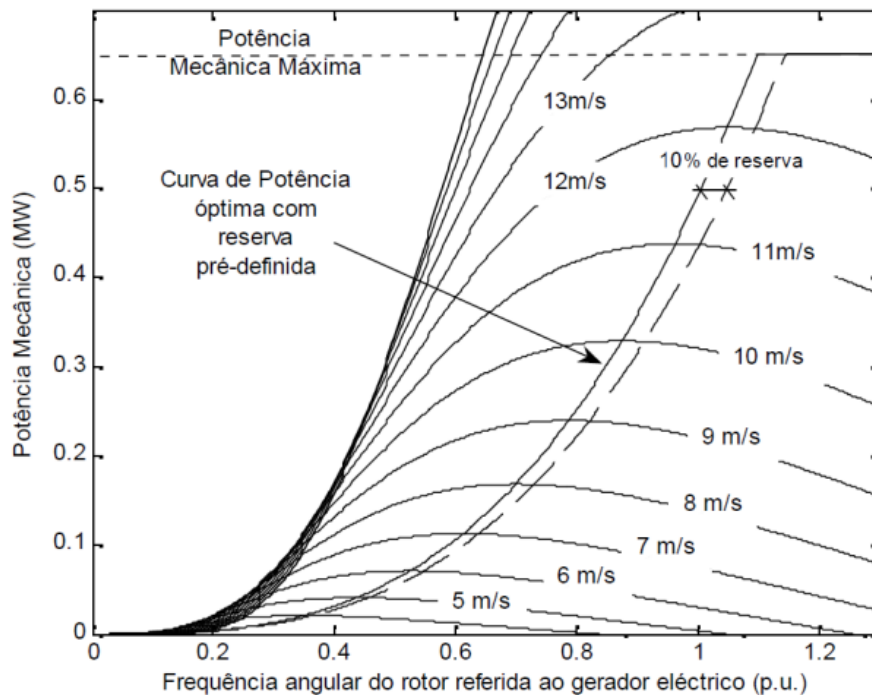


Figura 3.12: Característica da potencia ativa com e sem *deload*

Por fim, tornou-se necessário proceder à implementação de modelos que simulassem as respostas do sistema de produção eólico a variações de tensão e de frequência, analogamente ao que tinha sido efetuado para as máquinas síncronas.

Desenvolvido em [32] e sendo uma aproximação bastante aceitável do comportamento de um sistema desta natureza, permite também a alteração de dois parâmetros que virão a ser fundamentais no auxílio ao processo de reposição: o controlo da potência ativa e reativa, injetadas ou absorvidas. Tal modelo foi decomposto em dois macroblocos para facilitar não só o processo intervenção nestes dois campos referidos mas também para permitir um melhor entendimento de como simulam o sistema eólico em si.

Expõe ainda o autor que a modelização deste controlador, do ponto de vista do programa, é uma carga, isto é, como se pretende um sistema produtor, os valores de saída têm de ser invertidos, o que torna assim que na realidade se modelize uma carga negativa.

1. Modelo de controlo de potência ativa

PLOAD, cujo diagrama de blocos é apresentado a seguir, está encarregue da injeção de potência ativa e resposta aos desvios de frequência da rede. Dependente de fatores externos como o vento, a sua introdução está também relacionada com a disponibilidade das restantes unidades de

geração eólica em serviço.

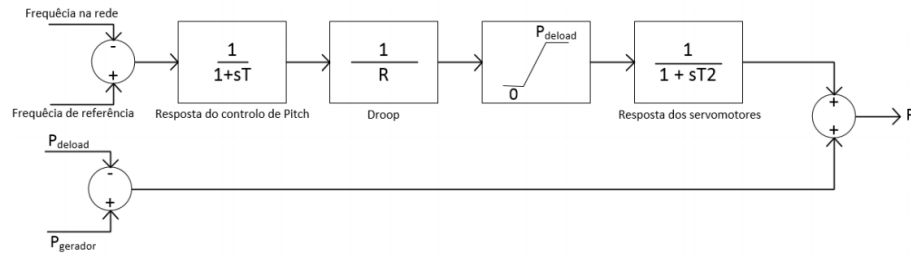


Figura 3.13: Diagrama de blocos do modelo PLOAD

São agora descritas as funções dos principais blocos presentes na Figura 3.14, que representa o esquema principal do modelo PLOAD, estando o de inicialização presente nos Anexos.

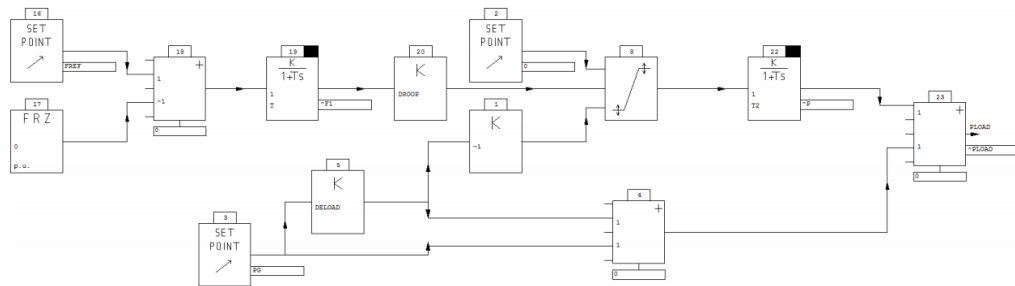


Figura 3.14: Esquema principal do modelo PLOAD

- O bloco 18 tem como função a diferença entre o valor de referência da frequência e o valor presente na rede naquele instante.
- O bloco 19 simula a resposta do controlo de *pitch*.
- O bloco 20 aplica um ganho, modelizando assim o controlo de *droop*.
- O bloco 8 limita a injeção de potência ativa de acordo com o valor de *deload* definido.
- O bloco 22 simula a resposta dos servomotores que controlam o ângulo de passo das pás do aerogerador.
- O bloco 23 tem como função a adição da potência proveniente da variação da frequência com a potência do sistema (situação esta em que o *deload* já é aplicado).

2. Modelo de controlo de potência reativa

Por outro lado, o macrobloco QLOAD simula a resposta do sistema eólico produtor a variações de tensão na rede e o respetivo diagrama de blocos pode ser observado na Figura 3.15 a seguir. O modelo de inicialização encontra-se nos Anexos ??.

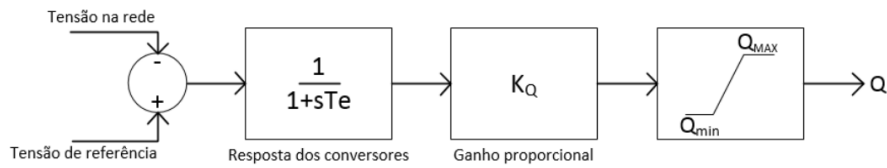


Figura 3.15: Diagrama de blocos do molelo QLOAD

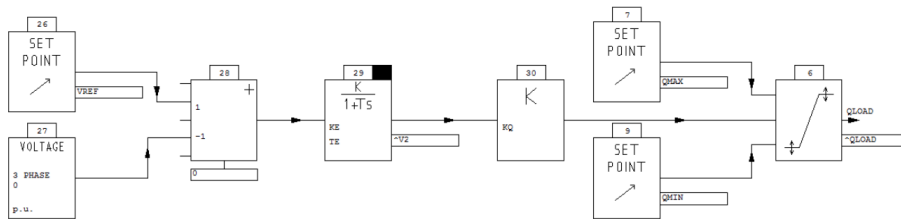


Figura 3.16: Esquema principal do modelo QLOAD

Também para este modelo foi efetuada uma implementação no EUROSTAG, representada a seguir bem como a respetiva descrição a da função dos blocos mais relevantes:

- Os blocos 28, analogamente ao modelo anterior, tem como função a diferença entre o valor da tensão de referência e o da tensão aos terminais do injetor dinâmico.
- O bloco 29 introduz um atraso, simulando assim a resposta do controlo dos conversores.
- O bloco 30 corresponde a um ganho. Caso existam variações negativas de tensão, a resposta deste controlador é injetar potência reativa. O mesmo acontece na situação oposta, em que as variações são positivas e então existe uma absorção de potência reativa.
- O bloco 6 está limitado por valores dos blocos 7 e 9, de potência reativa máxima e mínima, respetivamente. Tendo em consideração a função referida do bloco 30, estes limites tanto atuarão como limites de injeção ou de absorção.

3.3.4 Cargas

A variação constante do consumo nas redes de um dado S.E.E. é sempre um fator a ter em consideração, esteja o sistema qualquer um dos estados. Desde o Normal ao em Colapso, a alimentação das cargas é sempre uma das principais prioridades e objetivos. Contudo, é muitas vezes dificultada devido à sua natureza dinâmica.

O EUROSTAG permite várias modelizações de carga, sendo um deles o caso em que cada carga presente no sistema tem associado a si mesma um subconjunto de outras cargas. Fica então o utilizador responsável por definir padrões de comportamento dinâmico para cada delas [28]. No entanto, optou-se nesta dissertação por um conhecimento concreto da situação de consumo nas redes criadas, sendo apenas criado um tipo de comportamento fixo, inerente a todas as subcargas do sistema.

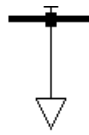


Figura 3.17: Representação gráfica de uma carga no EUROSTAG

Capítulo 4

Casos de Estudo e Resultados obtidos

4.1 A Rede e os seus Constituintes

Tal como foi proposto nos Objetivos desta dissertação [1.2](#), o principal interesse foi perceber o impacto que uma dada sequência de ações de Reposição de Serviço tem num Sistema Elétrico de Energia (S.E.E.) com geração eólica em que é aplicada. Através da alteração de certos componentes e características dos elementos constituintes, foram criadas redes distintas por forma a estudar e encontrar a melhor estratégia de Reposição de Serviço para aquele S.E.E..

As seguintes considerações estendem-se a todos os Casos de Estudo analisados:

- Todas as estratégias de Reposição de Serviço são apresentadas considerando uma rede fragmentada, em pós-colapso e com os sistemas de proteção das linhas de transmissão ativos, isto é, todas as linhas se encontram desligadas em ambos os pontos de interligação.
- Apesar de serem redes com características diferentes, a estratégia de Reposição de Serviço tem sempre como objetivo principal a maximização da alimentação das cargas e a minimização do tempo total do processo.
- O intervalo admissível de variação de tensão no sistema é de $[0,95 < V(\text{p.u.}) < 1,10]$.
- O intervalo admissível de variação da frequência no sistema é de $[49,5 < f(\text{Hz}) < 50,2]$, definido em [\[33\]](#).
- Em momento algum do processo de Reposição de Serviço podem estes valores ser violados. Esta restrição tem por base a preservação da estabilidade do sistema, evitando assim que este regresse a uma situação de colapso.
- Não sendo exequível a simulação de eventos com tempos de inicialização reais (uma a seis horas para típicas máquinas síncronas térmicas como as modelizadas neste trabalho), optou-se por atribuir um valor que se destacasse das restantes operações efetuadas na rede durante o processo de Reposição de Serviço mas que fosse suficientemente elevado para que colocasse o sistema num modo de espera. Tal período de tempo teria de ser claramente

visível na posterior análise de resultados em certas grandezas (por exemplo, na frequência). Os valores das várias ações presentes nas sequências dos processos de Reposição de Serviço são seguidamente apresentados:

- 40 segundos para a alimentação de cargas e abertura/fecho de linhas de transmissão.
- 1200 segundos (20 minutos) para a inicialização das unidades de geração térmicas.
- Sendo idealizado como um sistema de transmissão em alta tensão (380 kV), as características das linhas de transmissão de alta tensão em corrente alternada das redes criadas são as seguintes:

Tabela 4.1: Características das linhas de transmissão

De - Para	Comprimento (km)	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)
3 - 4	100	0,00208	0,02285	0,27869
3 - 10	100	0,00208	0,02285	0,27869
4 - 6	100	0,00208	0,02285	0,27869
6 - 8	150	0,00311	0,0342	0,418
10 - 12	50	0,001	0,0114	0,139346
10 - 14	100	0,00208	0,02285	0,27869
14 - 15	100	0,00208	0,02285	0,27869
14 - 17	100	0,00208	0,02285	0,27869
14 - 21	150	0,00311	0,0342	0,418
15 - 29	100	0,00208	0,02285	0,27869
17 - 19	50	0,001	0,0114	0,139346
21 - 22	100	0,00208	0,02285	0,27869
21 - 25	100	0,00208	0,02285	0,27869
25 - 27	150	0,00311	0,0342	0,418
29 - 31	100	0,00208	0,02285	0,27869

- Tal como referido no capítulo da Modelização do Sistema [3], escolheu-se um tipo de transformadores de razão fixa. A justificação da escolha prende-se com a não alteração dos valores de tensão pela atuação automática nas tomadas ou de transformadores de razão variável. Os transformadores foram definidos segundo duas grandezas:
 - Resistência, com o valor de 0,000185 p.u.
 - Reatância, com o valor de 0,00769 p.u.
- Relativamente às máquinas síncronas térmicas usadas, como também já referido no capítulo da Modelização de Sistema, foram definidas pelos seus parâmetros externos. É seguida-mente apresentada uma tabela com as características mais relevantes:

Tabela 4.2: Características das máquinas síncronas

Nome	GEN 1	GEN 2	GEN 3	GEN 4	GEN 5	GEN 6
Tipo	Térmica					
Potência Aparente (MVA)	192	233	384	384	448	384
Potência Nominal (MW)	163	198	326	326	380	326
Absorção Máxima de Potência Reativa (MVA)	60	72	120	120	139	120
$\cos \varphi$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Tensão aos terminais (kV)	18	20	24	24	24	24

Para além de todas as restrições presentes nas redes desenvolvidas, nos seus constituintes e da própria estratégia de Reposição de Serviço, foi ainda necessário ter em consideração a não existência de sistemas de proteção adaptativos. Em grande parte dos S.E.Es. atuais, existente a capacidade de proteção que previne a danificação dos equipamentos bem como do S.E.E.. Estes sistemas de proteção atuam automaticamente após um certo limite de tensão ou mesmo de frequência ser atingido. Tal ação permite ao Operador, não só uma maior segurança do sistema a montante daquele ponto mas também não se apresenta como mais uma variável a ter em consideração. Seja durante o próprio processo de Reposição ou mesmo na exploração do S.E.E. no seu Estado Normal. Tendo como um dos objetivos o estudo aprofundado de uma estratégia de reposição de serviço com recurso a ilhas elétricas auxiliada por uma componente de PD, foram então desenvolvidos 3 casos de estudo:

- Caso de Estudo 1 – S.E.E. com máquinas síncronas térmicas com capacidade de *blackstart* [4.2].
- Caso de Estudo 2 – S.E.E. com máquinas síncronas térmicas com e sem capacidade de *blackstart* [4.3].
- Caso de Estudo 3 – S.E.E. com máquinas síncronas térmicas com e sem capacidade de *blackstart* e com geração eólica [4.4].

Para os primeiros dois casos a rede criada não sofreu qualquer alteração. Todos os equipamentos, linhas e cargas são iguais sendo que a mudança ocorre ao nível da estratégia de Reposição de Serviço. Enquanto que no Caso 1 se assumiu que todas as unidades de geração possuíam a capacidade de auto arranque (*blackstart*), já no segundo apenas as máquinas GEN2 e GEN4 tinham essa particularidade.

Relativamente ao Caso de Estudo 3, a única e grande alteração foi a adição da geração eólica. Tendo como objetivo o auxílio do processo de Reposição de Serviço, a rede criada é em tudo análoga à dos Casos 1 e 2, sendo acrescentados nos barramentos 16 e 18 injetores modelizados, e já explicados neste documento, para simular o comportamento de um sistema de produção eólico.

apenas foi possível dadas as características do sistema e de ser então possível a aplicação de ações paralelas. Dessas características, destacam-se as vantagens de tentar restabelecer uma rede composta por ilhas elétricas e máquinas com capacidade de auto arranque (*blackstart*) e a possibilidade de desenvolver ações paralelas em diferentes áreas do sistema.

Adicionalmente, uma das prioridades esteve relacionada com o consumo de energia da rede. A par do restabelecimento do equilíbrio do sistema, procurou-se alimentar assim que possível as cargas deste, atuando então em duas frentes: Reposição do Serviço ao consumidor e auxílio às restantes fases do processo que ainda não estivessem concluídas. Destas, entenda-se o fecho de linhas de transmissão que, também como já referido anteriormente, injetam potência reativa que terá de ser absorvida pelos equipamentos do sistema, mais propriamente as unidades de geração e as cargas através do consumo deste tipo de potência.

É então agora apresentada a sequência de ações para a Reposição de Serviço encontrada para este Caso.

- | | |
|---|---|
| • 1240s - Fecho da linha de transmissão 3-4 | • 1360s - Fecho da linha de transmissão 14-17 |
| • 1240s - Alimentação da carga 11 | • 1360s - Fecho da linha de transmissão 15-29 |
| • 1240s - Alimentação da carga 24 | • 1360s - Fecho da linha de transmissão 21-25 |
| • 1240s - Alimentação da carga 30 | • 1400s - Fecho da linha de transmissão 14-21 |
| • 1240s - Alimentação da carga REF | • 1400s - Alimentação da carga 13 |
| • 1280s - Fecho da linha de transmissão 14-15 | • 1400s - Alimentação da carga 18 |
| • 1280s - Fecho da linha de transmissão 21-22 | • 1400s - Alimentação da carga 26 |
| • 1280s - Fecho da linha de transmissão 29-31 | • 1440s - Fecho da linha de transmissão 14-10 |
| • 1280s - Fecho da linha de transmissão 6-4 | • 1440s - Fecho da linha de transmissão 17-19 |
| • 1280s - Alimentação da carga 5 | • 1440s - Fecho da linha de transmissão 25-27 |
| • 1320s - Fecho da linha de transmissão 3-10 | • 1480s - Alimentação da carga 5 |
| • 1320s - Alimentação da carga 7 | • 1480s - Alimentação da carga 7 |
| • 1320s - Alimentação da carga 16 | • 1480s - Alimentação da carga 20 |
| • 1320s - Alimentação da carga 23 | • 1480s - Alimentação da carga 28 |
| • 1320s - Alimentação da carga 32 | • 1520s - Fecho da linha de transmissão 8-6 |
| • 1360s - Fecho da linha de transmissão 10-12 | • 1560s - Alimentação da carga 9 |

Figura 4.2: Sequência de ações de Reposição de Serviço do Caso de Estudo 1

A sequência começa então pelo tempo de inicialização das máquinas síncronas térmicas, apresentado no início deste capítulo como sendo de 20 minutos (1200s). Após estarem todas inicializadas, procede-se ao fecho da linha de transmissão do 3-4, sendo este o primeiro passo a tomar para a posterior alimentação das cargas da ilha elétrica formada pelos GEN1 e GEN2. Paralelamente, e nas restantes ilhas, as cargas do barramento de referência (REF) e do 11, 24 e 30 sofrem um aumento de potência.

Estando o sistema com as condições necessárias técnicas para suportar o fecho de linhas de transmissão adicionais, procedeu-se então à energização dos ramos 14-15, 21-22, 29-31 e 6-4. Entenda-se por condições necessárias técnicas a capacidade e disponibilidade por parte das máquinas síncronas para absorver a potência reativa proveniente destas ações. Torna-se agora importante explicar o porquê da energização das linhas 14-15 e 21-22, em substituição das linhas 14-17 e 21-25, respetivamente.

Após várias simulações, em que a frequência do sistema descia vertiginosamente para valores não aceitáveis (aprox. 30Hz) quando se tentavam energizar as referidas linhas, conclui-se que para a evolução do processo de reposição era necessário que existisse uma maior capacidade de absorção/consumo de energia reativa antes de se fecharem estas linhas. Assim, e sendo a justificação análoga para ambas as ilhas, optou-se por primeiro fechar as linhas de transmissão que posteriormente conduzissem à alimentação de uma só carga, não implicando assim a energização de mais linhas. Não foi ligado qualquer ramo de interligação entre ilhas elétricas pelas mesmas razões. Este é mais um exemplo de ações paralelas possíveis num processo de reposição com as características dos equipamentos referidas. Ainda aos 1280s é alimentada a carga 5, podendo tal ação ser efetuada, dado que já se tinha estabelecido a ligação entre o barramento 5 e as unidades de geração GEN1 e GEN2 aos 1240s.

Aos 1320s ocorre uma das partes mais importantes desta sequência de ações. O evento da alimentação das cargas cujas linhas tinham sido previamente energizadas cumpre com o objetivo principal (reposição de cargas) e serve de apoio às máquinas síncronas no consumo de energia reativa produzida pelo fecho das restantes linhas. São assim alimentadas as cargas 7, 16, 23 e 32. De notar que cada carga pertence a ilhas diferentes, provando uma vez mais a diminuição de tempo através de ações simultâneas. Para além desta preparação do sistema, este momento temporal é ainda fulcral pois é feita a primeira interligação entre ilhas, através da linha de transmissão 3-10, nomeadamente das ilhas compostas pelas máquinas síncronas GEN1/GEN2 e GEN3. A decisão desta ação tornou-se clara quando se observou que a máquina GEN3 não tinha capacidade de absorção da energia reativa gerada pelo fecho da linha de transmissão 10-12.

Na Figura 4.3 seguinte é possível observar o descrito. Aos 1240s, momento em que é alimentada a carga 11, a frequência desce para valores aproximadamente iguais a 49,7Hz. Apesar de estar dentro dos limites definidos, é possível concluir que, sem auxílio de outras unidades de geração (ilha 1) o GEN3 não seria capaz de suportar toda a energia reativa proveniente do fecho da linha de transmissão em questão. O fecho da linha provoca assim grandes variações de frequência. O momento 1360s, altura em que ocorre a energização pode também ser observado pois é um dos períodos em que a frequência mais variou neste barramento. Será posteriormente analisada neste Caso a resposta em termos de potência ativa e reativa injetada (ou absorvida) por parte desta unidade de geração.

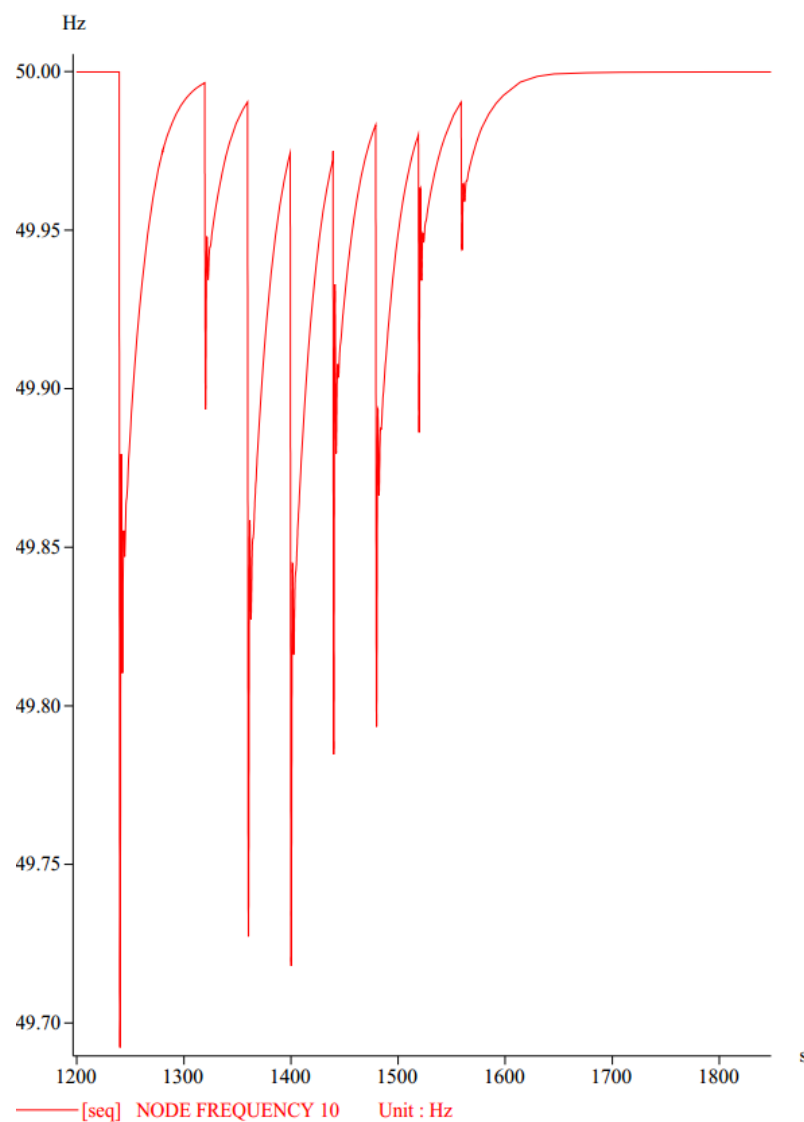


Figura 4.3: Evolução da frequência no barramento 10 do Caso de Estudo 1

Procedeu-se então, aos 1360s, à energização dos ramos 10-12 / 14-17 / 15-29 / 21-25. Este é mais um momento em que se ligam duas ilhas elétricas, a ilha do GEN4 e do GEN6. Pode-se observar os valores envolvidos no trânsito de potências do ramo que as liga.

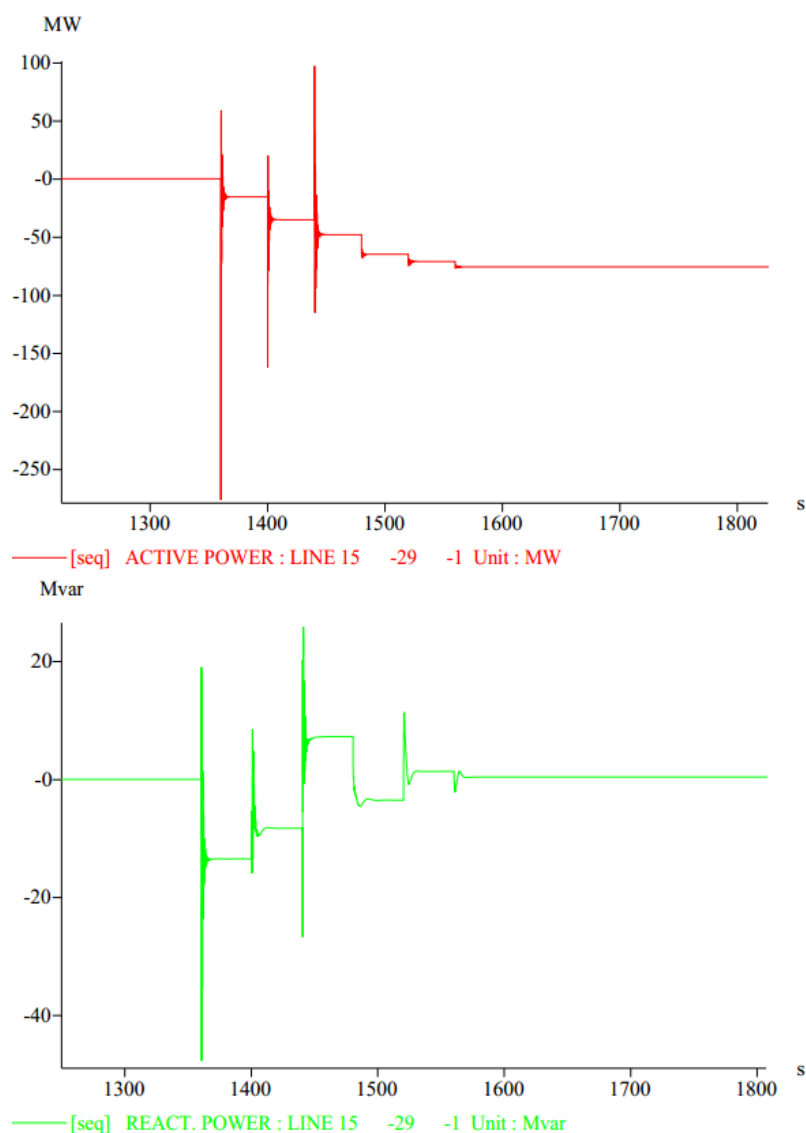


Figura 4.4: Evolução da potência ativa e reativa na linha 15-29 do Caso de Estudo 1

Como se apresenta nos gráficos da Figura 4.4, observa-se que para os 1360s ocorre o momento em que mais potência transita na linha. Os valores vão sendo entretanto atenuados ao longo do processo de reposição, dada a entrada de novos pontos de consumo na rede, sendo assim a energia distribuída por outros ramos. De salientar que as outras grandes variações em ambos os gráficos resultam de ações de energização de linhas e alimentação de cargas em ramos ligados ao barramento 14. Ora, prova-se aqui que a potência reativa é então distribuída entre ambas as máquinas (GEN3 e GEN4) no processo de reposição.

São seguidamente alimentadas as cargas 12, 18 e 26 aos 1400s, pois aos 1440s ocorre mais um conjunto de energização de linhas, nomeadamente das linhas 14-10 / 17-19 / 25-27. Salienta-se a ligação do ramo 14-10, pois junta 4 das 5 ilhas inicialmente existentes, ficando assim apenas a ilha do GEN5 isolada do sistema. Este é o momento ideal para analisar se as restrições de tensão

e frequência, expostas no início deste Capítulo, são cumpridas. Para tal, decidiu-se analisar as variáveis referidas no barramento 14, sendo este o que liga todas as ilhas referidas.

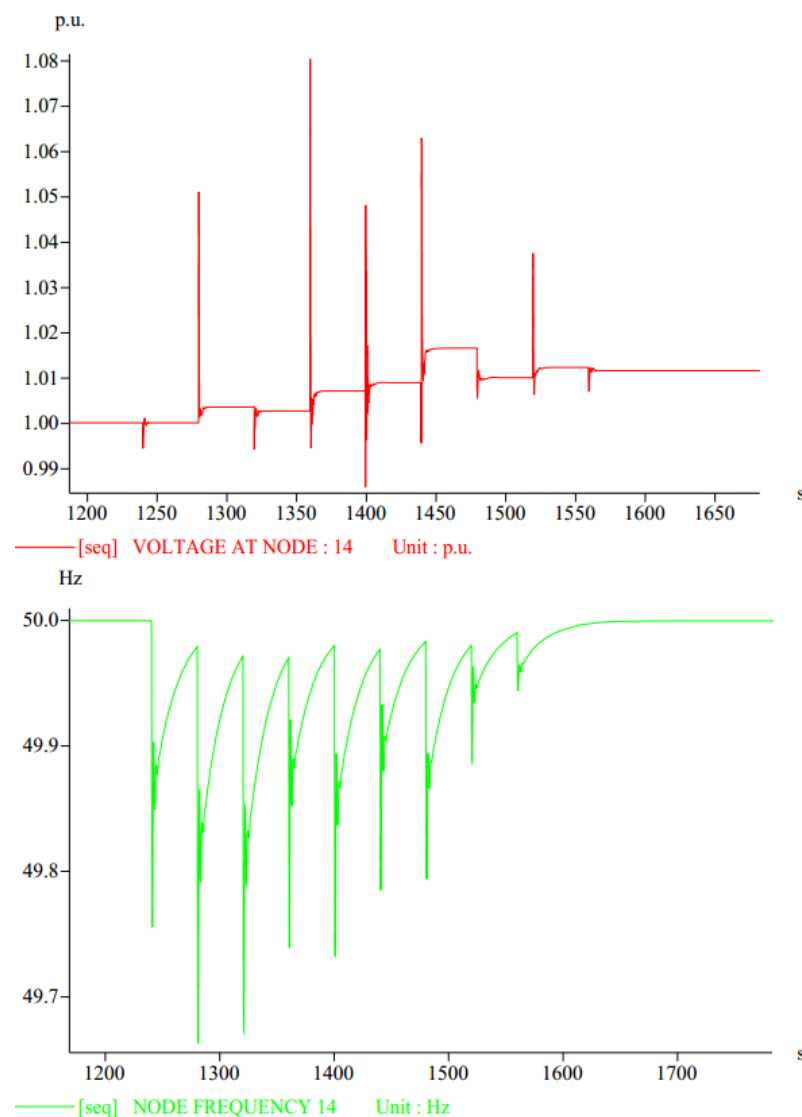


Figura 4.5: Evolução da tensão e frequência no barramento 14 do Caso de Estudo 1

O momento da ligação das ilhas referidas, aos 1440s, é então visível na Figura 4.5. O facto de não ser um dos momentos de maior variação, quer em termos de frequência ou tensão, deve-se ao facto dos sistemas ligados terem já uma elevada capacidade conjunta de absorção de potência reativa proveniente do fecho da linha. Não deixa contudo de ser um período importante e de revelar que em qualquer outro, os limites de tensão e frequência não foram violados.

Seguidamente, são alimentadas as cargas conectadas às linhas energizadas, mais especificamente a 5, 7, 20 e 28. A decisão do aumento de potência nas cargas 5 e 7 deve-se ao facto de no barramento 8, após o fecho da linha de transmissão de grandes dimensões (150 km) 8-6, observou-se que a tensão excedia o limite máximo definido de 1,1 p.u.. Este aumento permite assim reduzir

esse valor, tornando o sistema equilibrado. Dá-se, por fim, a alimentação da carga 9.

Analisa-se agora as respostas das diferentes máquinas em potência ativa e reativa, nomeadamente nos momentos de ligação entre ilhas elétricas.

A Figura 4.6 apresentada a seguir pretende mostrar a produção de potência ativa por parte das máquinas síncronas GEN4 e GEN6 e o momento em que a linha de transmissão 15-29 é energizada, respetivamente. Neste último procede-se à interligação das ilhas elétricas dos GEN4 e GEN6 aos 1360s. Como se pode observar, existe um efeito esperado de oscilação que simboliza a resposta de ambas as máquinas à presença de um novo sistema, ou seja, a resposta do GEN4 à introdução da ilha do GEN6 é diferente da máquina síncrona presente neste último. Contudo, nos instantes seguintes ambas tentam rapidamente encontrar um ponto que satisfaça todas as condições e restrições. Já o primeiro demonstra a produção durante todo o processo de reposição, estabilizando-se ambas as produções entre os 160MW e os 180 MW.

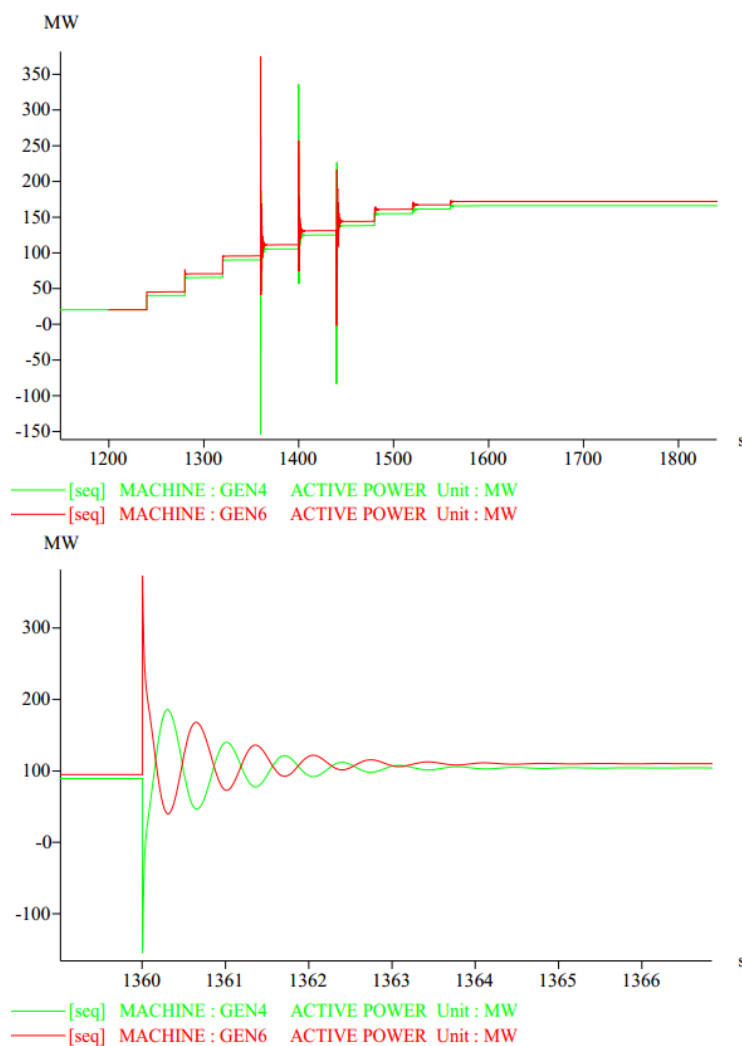


Figura 4.6: Evolução da potência ativa gerada pelas máquinas GEN4 e GEN6 do Caso de Estudo

Por fim, decidiu-se apresentar o comportamento da máquina síncrona térmica GEN4 em termos de injeção/absorção de potência reativa, não só por estar ligada ao barramento que faz a ponte entre o sistema e o barramento de referência (REF) mas também por ser um ponto fundamental na ligação entre as diferentes ilhas elétricas durante todo o processo de Reposição de Serviço.

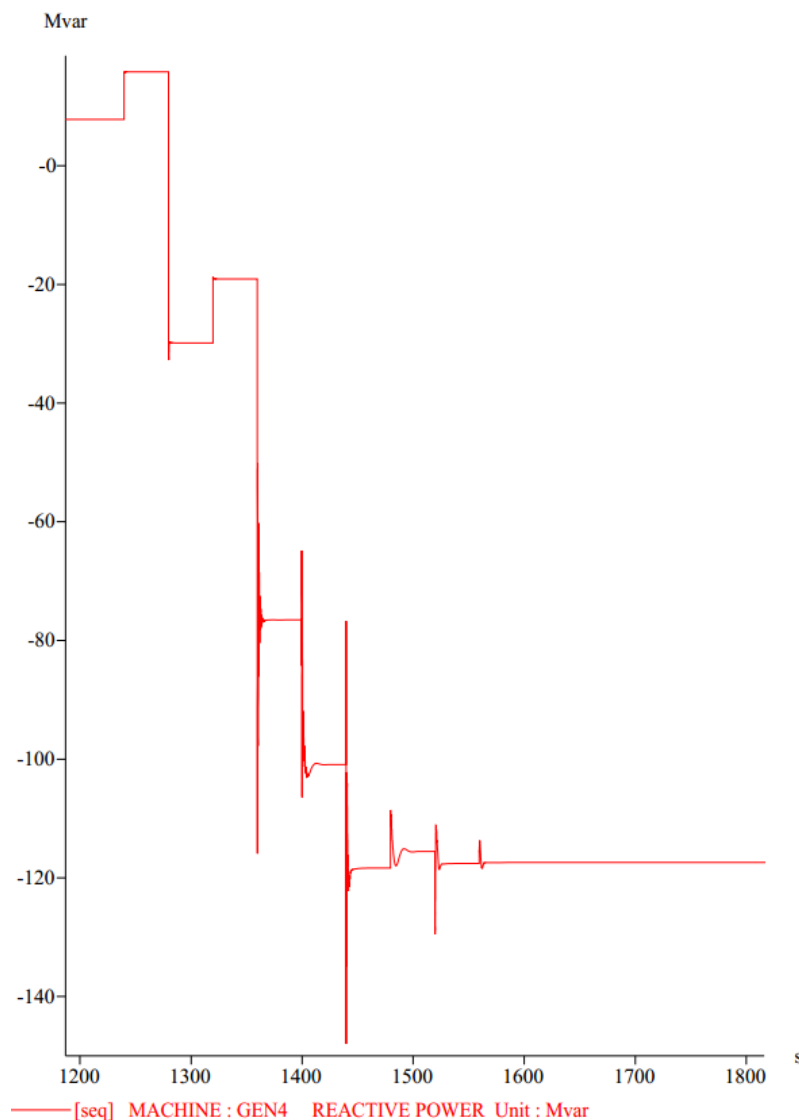


Figura 4.7: Evolução da potência reativa gerada pela máquina GEN4 do Caso de Estudo 1

Da Figura 4.7 anterior, destacam-se os seguintes momentos com as respetivas conclusões:

- Aos 1280s, existe uma absorção de potência reativa proveniente do fecho da linha de transmissão 14-15, que depois de estabilizada, é diminuída dada a alimentação da carga 16. Esta diminuição de absorção é traduzida por um aumento na injeção de potência reativa para alimentar a carga.

É então agora apresentada a sequência de ações para a Reposição de Serviço encontrada para este Caso.

- 40s – Energização do transformador 1-3
- 40s - Alimentação da carga REF
- 80s - Fecho da linha de transmissão 14-21
- 80s - Fecho da linha de transmissão 3-10
- 120s - Alimentação da carga 11
- 120s - Alimentação da carga 24
- 160s - Fecho da linha de transmissão 14-15
- 200s - Fecho da linha de transmissão 14-10
- 200s - Alimentação da carga 16
- 240s - Fecho da linha de transmissão 10-12
- 280s - Alimentação da carga 13
- 1240s – Inicialização do GEN1
- 1280s - Fecho da linha de transmissão 3-4
- 1280s – Inicialização do GEN3
- 1280s – Inicialização do GEN5
- 1320s - Fecho da linha de transmissão 14-17
- 1320s - Fecho da linha de transmissão 15-29
- 1320s - Fecho da linha de transmissão 21-25
- 1320s - Fecho da linha de transmissão 21-22
- 1320s - Fecho da linha de transmissão 6-4
- 1320s - Alimentação da carga 5
- 1360s - Fecho da linha de transmissão 17-19
- 1360s - Alimentação da carga 7
- 1360s - Alimentação da carga 18
- 1360s - Alimentação da carga 23
- 1360s - Alimentação da carga 26
- 1360s - Alimentação da carga 30
- 1400s - Fecho da linha de transmissão 25-27
- 1400s - Alimentação da carga 20
- 1400s - Alimentação da carga 28
- 2520s – Inicialização do GEN6
- 2540s - Fecho da linha de transmissão 29-31
- 2580s - Alimentação da carga 32
- 2620s - Fecho da linha de transmissão 8-6
- 2660s - Alimentação da carga 9

Figura 4.9: Sequência de ações de Reposição de Serviço do Caso de Estudo 2

A sequência começa por envolver a energização do transformador de ligação entre os barramentos 1 e 3 por parte do GEN2, com o objetivo de alimentar a máquina GEN1, para esta ter a energia necessária para o seu arranque. Dado que o tempo de inicialização das máquinas síncronas presentes nos Casos de Estudo analisados e definido no início deste Capítulo é de 1200s (20 minutos), a unidade de geração só estará disponível aos 1240s. É ainda alimentada a carga do barramento de referência (REF), aumento de potência este que provém do GEN4, a outra máquina síncrona com capacidade de auto arranque.

Seguidamente, aos 80s, é efetuado o fecho de duas linhas de transmissão: 14-21 e 3-10. Apesar da prioridade principal da Reposição de Serviço se manter inalterada (alimentação das cargas e minimização do tempo total do processo), há certos passos que têm de ser previamente tomados. Neste ponto do sistema, torna-se mais importante energizar as linhas de transmissão do sistema, para repor o mais rapidamente possível as unidades de geração de novo disponíveis. Dado que a máquina GEN2 também não conseguiria suportar o fecho da linha de transmissão 3-4 (com o objetivo posterior de alimentar a carga 5), a única opção a tomar consistiu no fecho do ramo 3-10.

O mesmo acontece com o GEN4. A opção de energizar a linha de transmissão 14-21 permitiu que o GEN5 recebesse a energia para o seu arranque.

Sendo então feita a alimentação das respectivas cargas disponíveis para receberem a energia transportada pelas linhas recentemente fechadas, procedeu-se à energização das linhas 14-15 e 14-10. Esta última pôde apenas ser efetuada pela participação conjunta de ambas as máquinas, em funcionamento neste momento da reposição, em absorver a potência reativa resultante da entrada em serviço da linha. Posteriormente, e sendo esse o objetivo inicial subjacente à ação referida, alimentou-se a carga 13.

Neste momento do processo da reposição é aconselhável analisar o sistema em termos de produção de energia, mais especificamente potência reativa, dado que não existe mais nenhuma opção até uma nova unidade de geração entrar em funcionamento. Todas as tentativas de energização de linhas se revelaram mal sucedidas, dado que a capacidade de absorção de potência reativa das máquinas não seria suficiente. Na Figura 4.10 apresentada seguidamente, pode-se observar o período de tempo inicial (até aos 400s) que revela o comportamento em termos de potência reativa de ambas as máquinas.

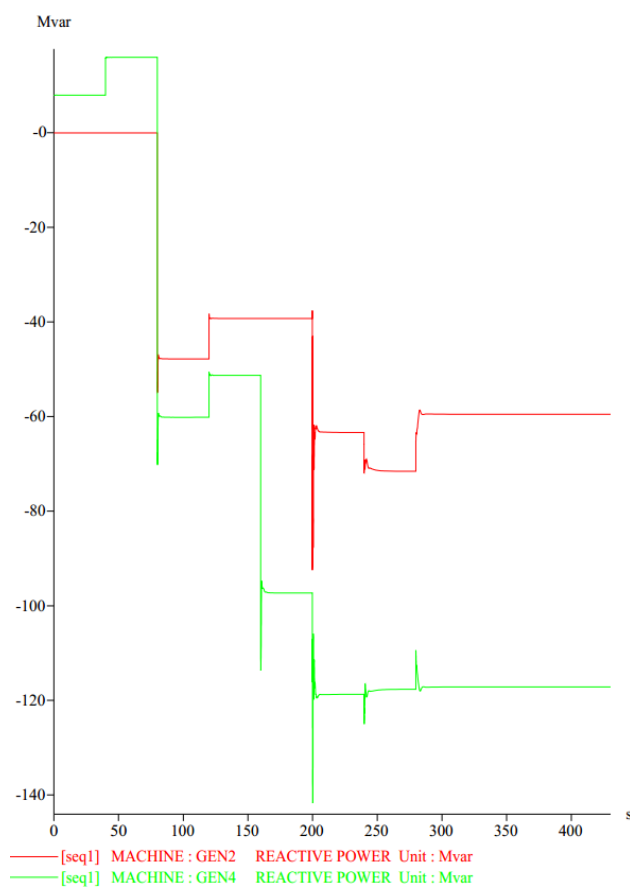


Figura 4.10: Evolução da potência reativa gerada pelas máquinas GEN2 e GEN4 do Caso de Estudo 2

Aos 200s, GEN4 e GEN2 contribuem para o equilíbrio produção/consumo do sistema ao absorver o fecho da linha 14-10, linha essa que providencia a ligação entre as máquinas. Tal como observado no caso anterior aquando da ligação entre ilhas, também aqui há um pequeno período temporal de adaptação até que ambas atingem um nível de produção de energia. Naturalmente, a máquina síncrona GEN4 participa mais ao absorver mais reativa pois possui uma capacidade de produção maior e assim uma absorção de potência reativa mais elevada, tal como mostrado no início deste Capítulo, na especificação das características de cada máquina. É, por fim, também interessante analisar a resposta que as máquinas dão mediante a energização da linha de transmissão 10-12. GEN2 apresenta um maior esforço para o conseguir, sendo apenas elevado o seu valor de potência reativa absorvida (através da produção da mesma) quando é alimentada a carga 13. O processo de reposição encontra agora um período de espera dada a impossibilidade de mais ações pelos motivos anteriormente explicitados.

Aos 1240s é então colocada de novo em funcionamento a máquina síncrona GEN1. A introdução desta máquina permite o fecho da linha de transmissão 3-4, permitindo a posterior alimentação de cargas e serviços auxiliares daquela zona do sistema. Ao mesmo tempo, ficam também disponíveis as unidades de geração GEN3 e GEN5, proporcionando assim mais opções de ações a tomar.

O momento seguinte à entrada destas três máquinas é um dos mais importantes neste processo. Aos 1320s ocorre o fecho de várias linhas de transmissão, nomeadamente das que ligam:

- O barramento 14 ao 17;
- O barramento 15 ao 29;
- O barramento 21 ao 25;
- O barramento 21 ao 22;
- O barramento 6 ao 4.

Considerou-se este um dos principais momentos do processo de reposição pois:

- É feita a alimentação do GEN6, podendo assim dar início ao seu processo de inicialização. Posteriormente nesta análise será justificada a razão pela qual não é possível energizar a linha de transmissão 29-31 antes desta máquina síncrona estar operacional.
- Parte da rede que ainda se encontrava em colapso (zona a montante do barramento 4) pode agora ser alimentada e o processo de reposição de cargas pode ser continuado.
- São fechadas duas linhas de transmissão que têm como ponto comum o barramento 21. Torna-se então relevante analisar características como a tensão e a frequência neste ponto do sistema por forma a observar/demonstrar que não são violadas as restrições inicialmente estabelecidas. Na Figura 4.11 são seguidamente mostrados estes dois gráficos.

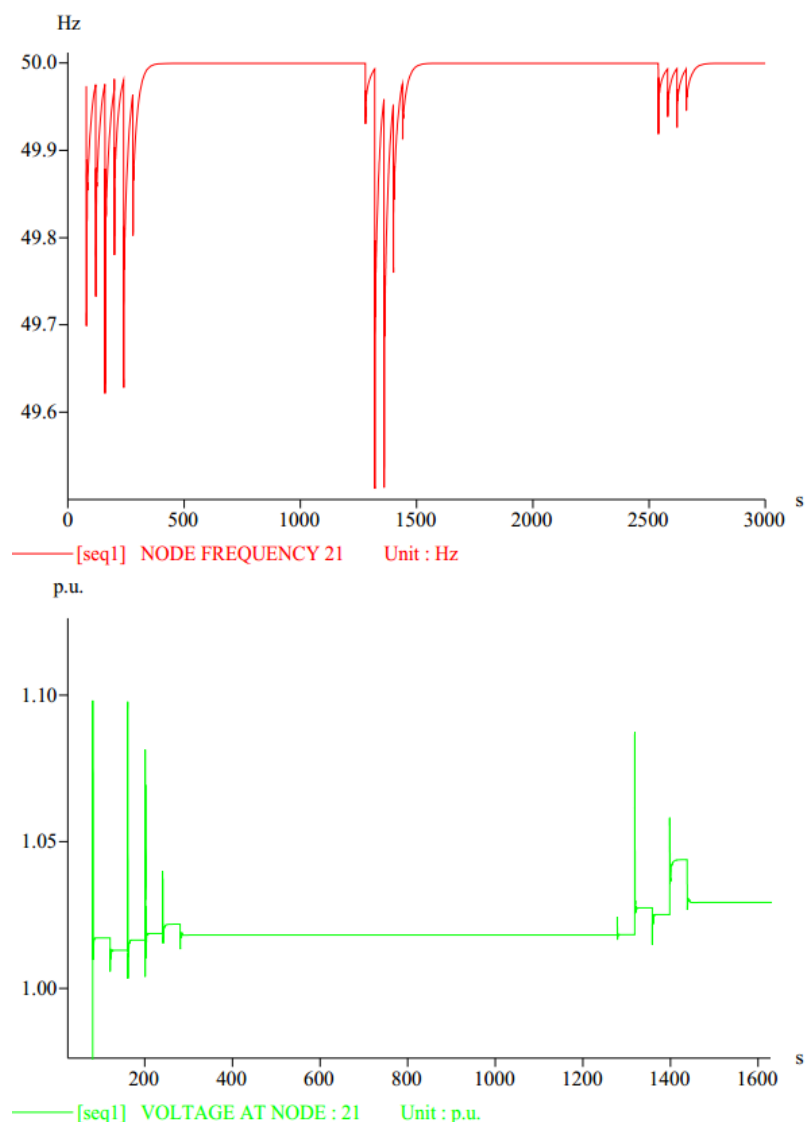


Figura 4.11: Evolução da frequência no barramento 21 do Caso de Estudo 2

Apresentando intervalos de tempo diferentes, existem dois momentos distintos em ambos os gráficos: no período inicial e aos 1320s. Se, por um lado, é o limite da tensão que mais próximo fica de ser violado nos instantes iniciais, por outro é a frequência que mais varia aos 1320s.

Relativamente ao primeiro gráfico, observa-se que a grande variação na frequência ocorre aos 1320s, quando do fecho das duas linhas de transmissão, 21-22 e 21-25. Tal só é possível pois a máquina que se encontra mais perto para proporcionar o fornecimento de potência reativa (ou, neste caso, de absorver essa grandeza proveniente da energização das duas linhas) é a que foi modelizada com maior capacidade de produção ativa. Pelo que foi mostrado no início deste Capítulo, esta característica faz dela a unidade de geração com maior poder de absorção de potência reativa. Já no gráfico que representa a tensão, dá-se especial destaque aos momentos iniciais, altura em que o limite de 1,1 p.u. é quase ultrapassado. Estando assim o sistema a trabalhar no limite das

suas capacidades apenas com as duas máquinas síncronas que inicialmente estavam disponíveis. O valor entretanto é diminuído devido à ligação de novas linhas, fazendo as máquinas absorver mais reativas e a alimentação de novas cargas contribuíram para a diminuição progressiva do valor naquele barramento.

Por fim, e para terminar as ações ocorridas ao instante 1320, é alimentada a carga 5.

Seguidamente, e após terem sido energizadas várias linhas, as respectivas cargas são alimentadas. Fecham-se também as linhas de transmissão 17-19 e 25-27. É então nesta altura do processo que, mais uma vez, o sistema tem de aguardar a entrada em funcionamento do GEN6. Apesar da linha 8-6 poder ser ligada, o sistema ficaria a funcionar nos limites muito próximos de frequência e tensão também em alguns pontos da rede (nomeadamente o barramento 8). Optou-se então por esperar que o GEN6 estivesse operacional e então proceder ao fecho dessa linha e da 29-31 e consequente alimentação das respetivas cargas.

Torna-se agora interessante analisar a resposta das várias máquinas do sistema às operações efetuadas no decorrer do processo de reposição (energização de linhas e alimentação de cargas) bem como os momentos em que entram em funcionamento e como isso afeta as restantes.

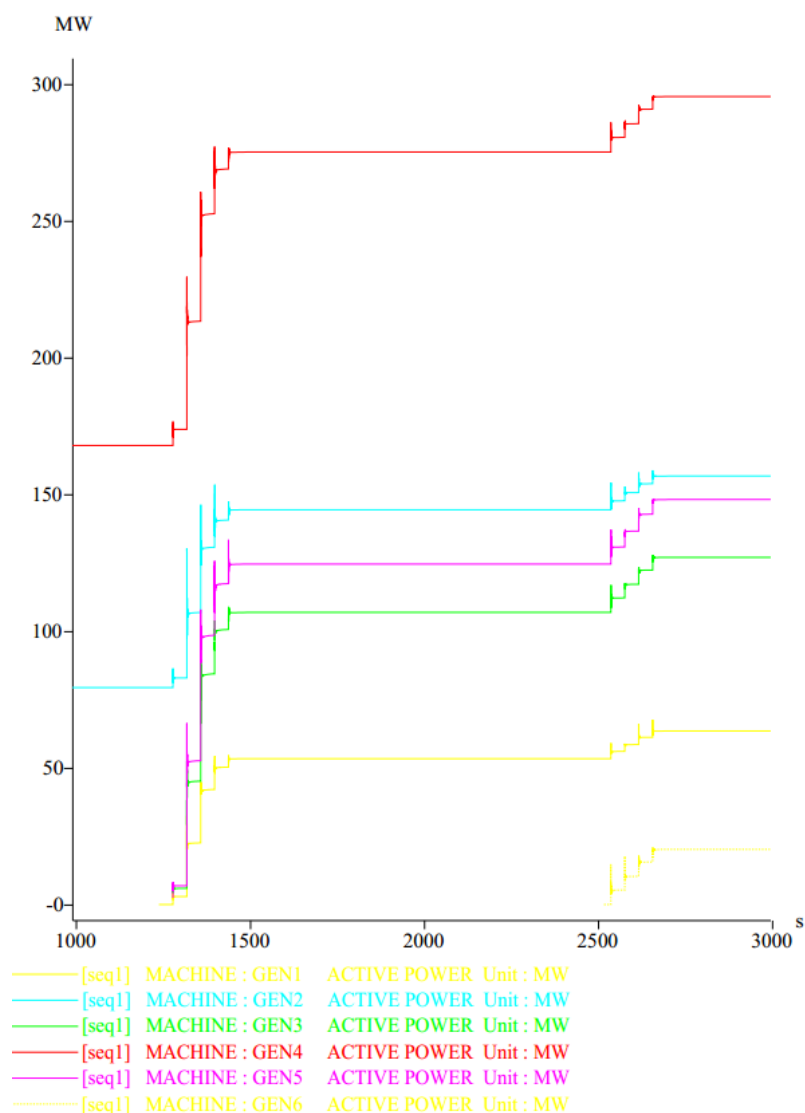


Figura 4.12: Evolução da potência ativa geradas nas máquinas do Caso de Estudo 2

Esta análise faz-se a partir do instante 1000s, dado que o comportamento das máquinas síncronas GEN2 e GEN4, as únicas ativas até esse momento, será analisado posteriormente. Tal como se pode observar, as máquinas têm exatamente o mesmo comportamento face às diferentes ações corridas no sistema, mas com níveis de geração distintos. Observa-se ainda que as máquinas GEN2 e GEN4 são as que mais contribuem com produção de potência ativa e absorção de reativa durante todo o processo, fazendo assim delas as principais a responderem às decisões do Operador.

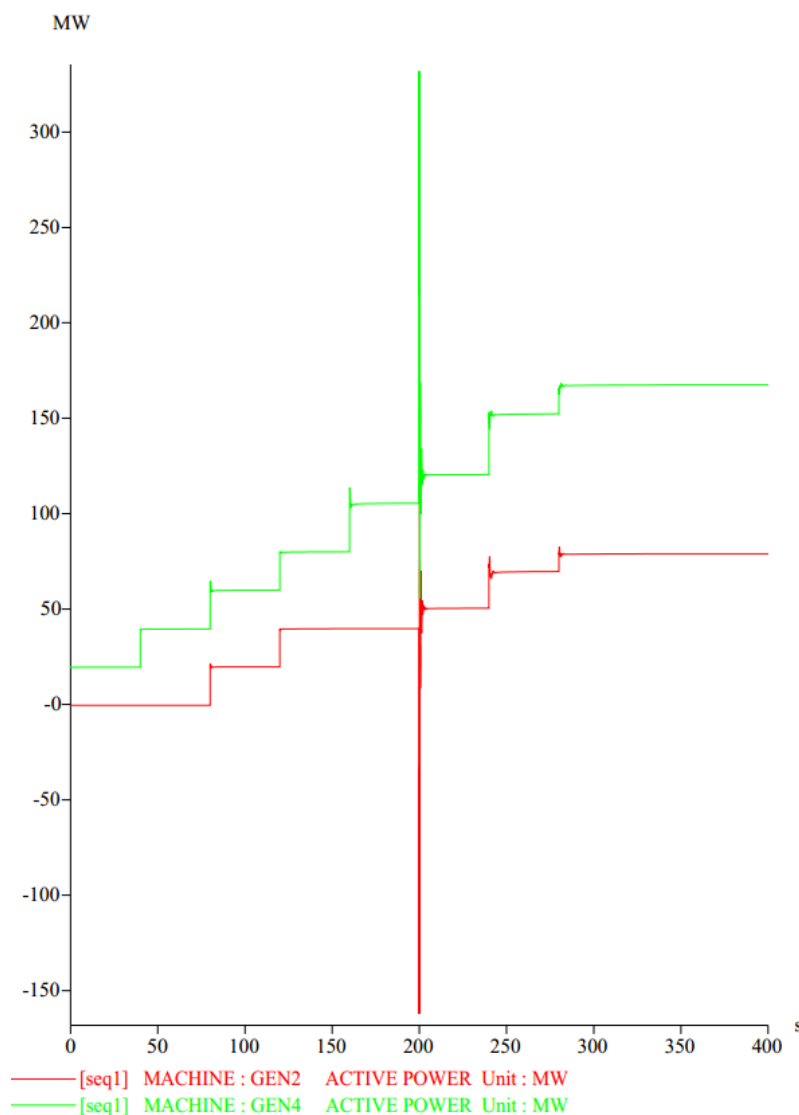


Figura 4.13: Evolução da potência ativa gerada nas máquinas GEN2 e GEN4 do Caso de Estudo 2

Na Figura 4.13, observam-se então os instantes iniciais das máquinas síncronas térmicas GEN2 e GEN4, sendo dado especial destaque para o momento aos 200s. Tal como analisado no caso anterior, também aqui é possível analisar a reação que ambas as unidades de geração têm quando os sistemas em que se encontram se ligam por um alinhamento de transmissão. Tendo a GEN4 uma maior capacidade de produção de potência aparente, produz então mais potência ativa, ficando perto do valor da sua potência nominal (384MW). Há também um período de tempo bastante reduzido de adaptação das máquinas, onde se verifica a ocorrência de oscilações entre geradores e que se vão amortecendo no tempo, encontrando então um valor de estabilização.

É analisada por fim a potência reativa produzida pelas diferentes unidades de geração do sistema. A Figura 4.14 a seguir apenas apresenta os valores após os 1000s, dado que as respostas das máquinas GEN2 e GEN4, únicas ativas até ao momento, já foram analisadas anteriormente neste

caso.

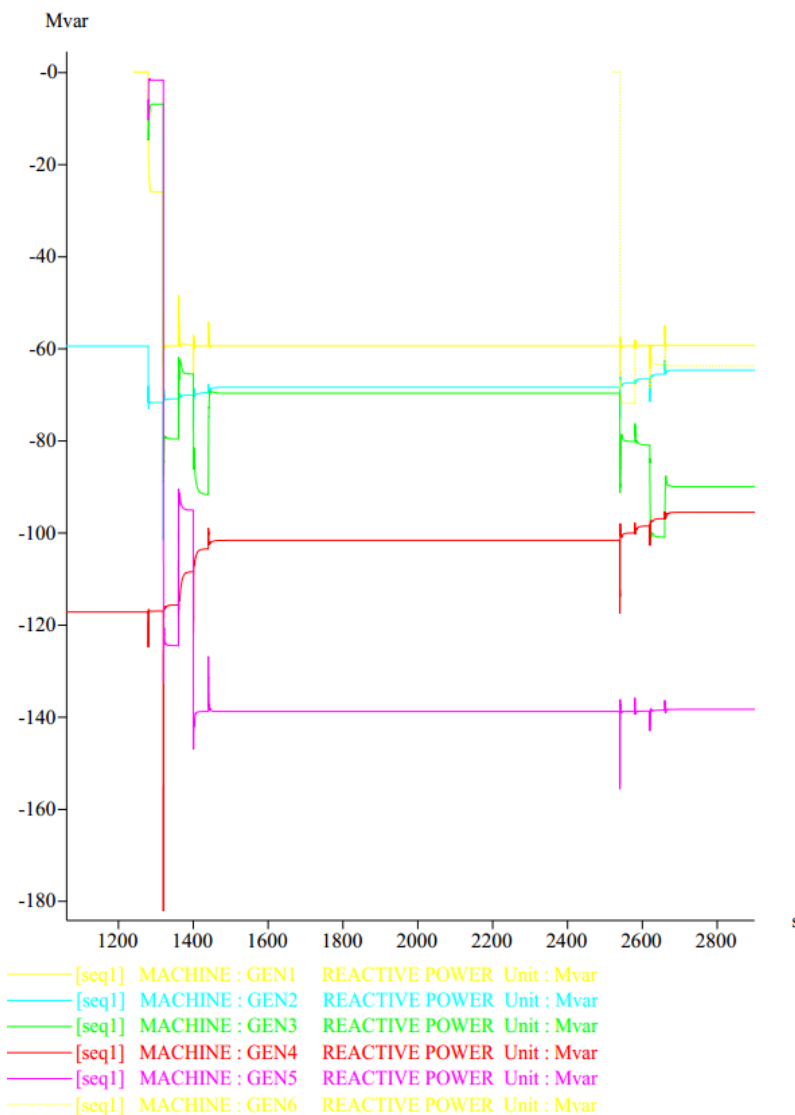


Figura 4.14: Evolução da potência reativa geradas nas máquinas do Caso de Estudo 2

Tal como se pode observar, todas as máquinas estão a absorver potência reativa, sendo possível em muitos casos apontar o instante em que dada linha de transmissão é fechada. É dado especial destaque à GEN5 que aos 1320s suporta o fecho das linhas de transmissão 21-22 e 21-25, tal como a GEN4. Comparando as Figuras (4.12 e 4.14) que retratam a situação de produção de potência ativa e reativa por parte das unidades de geração, respetivamente, é possível observar que variações da potência ativa gerada conduzem a uma resposta destas mesmas máquinas na componente reativa. Analisando o intervalo de tempo compreendido entre os 1000s e os 1500s, observa-se, por exemplo, que há uma redução da absorção de potência reativa que é acompanhada por um aumento na produção de potência ativa. O mesmo acontece com as outras máquinas, sendo os picos em ambos os gráficos atribuídos à alimentação de cargas e energização de linhas

de transmissão.

4.4 Caso de Estudo 3

A integração de PD, mais especificamente de geração eólica, é uma realidade cada vez mais contante e com inclinação para aumentar a sua percentagem nos S.E.Es. atuais. Assim, surge uma preocupação e interesse em conhecer o impacto que este tipo de tecnologia pode causar num processo de Reposição de Serviço.

Tal como se verificou no caso anterior, o processo de reposição teve períodos de tempo longos sem que qualquer ação estivesse ou pudesse ocorrer, devido ao tempo de inicialização das máquinas síncronas térmicas. Sabendo que um dos objetivos principais da reposição é a minimização do tempo do processo, decidiu-se introduzir no sistema dois parques eólicos, E18 e E16 (pôr em nota de rodapé que PE é uma abreviatura para Parque Eólico), nos barramentos 18 e 16, respetivamente, tal como a Figura 4.15 demonstra:

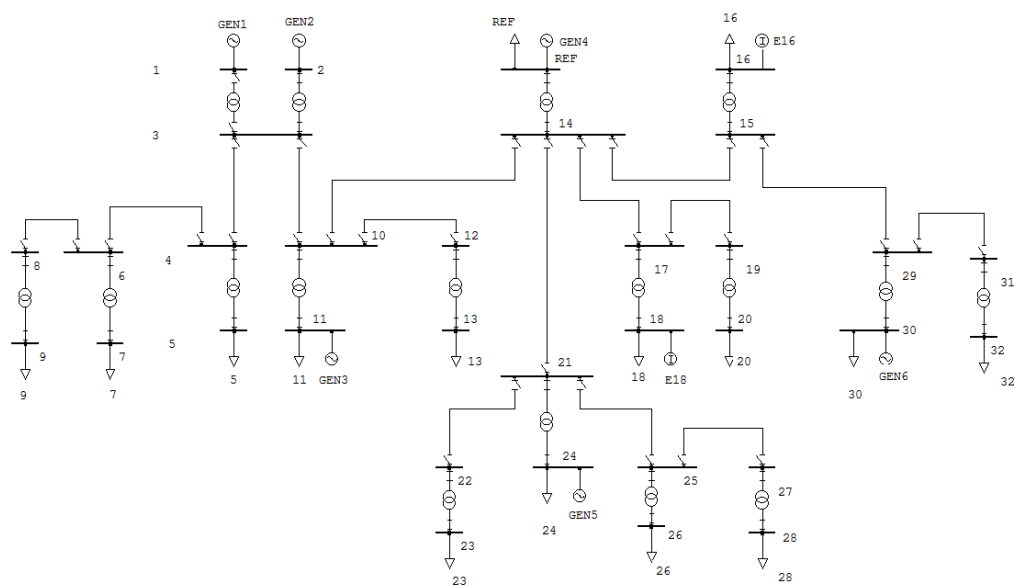


Figura 4.15: Diagrama Unifilar do S.E.E. do Caso de Estudo 3

Tendo em consideração o já referido no Capítulo 3 sobre a Modelização do Sistema de geração eólico no EUROSTAG, torna-se agora necessário explicar o processo de cálculo da quantidade de injeção de potência ativa por parte das centrais eólicas. As seguintes considerações são necessárias:

- As centrais eólicas têm uma potência instalada de 100MW.
- Cada aerogerador presente nestas centrais possui 2MW de potência nominal.

- Dado o tipo de tecnologia, foram também tidos em consideração os fatores limitativos que a geração eólica enfrenta, tais como o vento. Para tal, propôs-se que estes apenas conseguissem produzir 60% da potência nominal, ou seja, 1,2MW.

Sabendo que então o número de aerogeradores é dado pelo quociente entre a potência ativa máxima injetável por parte do Parque Eólico pela potência máxima passível de ser extraída a um aerogerador.

$$Num.aerogeradores = valor(MW)/1,2 \quad (4.1)$$

Por outro lado, a capacidade de injeção/absorção de potência reativa é dada por:

$$Potencia_{reativa} = valor(MW) \times 0,3 \times 2 \quad (4.2)$$

Relembrando que as restrições inicialmente impostas não podem ser violadas, apresenta-se seguidamente a sequência encontrada:

- | | |
|--|---|
| • 40s - Energização do transformador 1-3 | • 1280s – Fecho da linha de transmissão 10-12 |
| • 40s - Alimentação da carga REF | • 1280s – Fecho da linha de transmissão 3-4 |
| • 80s - Fecho da linha de transmissão 14-21 | • 1280s – Inicialização do GEN3 |
| • 80s - Fecho da linha de transmissão 3-10 | • 1280s – Inicialização do GEN5 |
| • 120s - Alimentação da carga 11 | • 1320s - Fecho da linha de transmissão 14-10 |
| • 120s - Alimentação da carga 24 | • 1320s - Fecho da linha de transmissão 21-22 |
| • 160s - Fecho da linha de transmissão 14-15 | • 1320s - Fecho da linha de transmissão 21-25 |
| • 160s - Fecho da linha de transmissão 14-17 | • 1320s - Fecho da linha de transmissão 6-4 |
| • 200s - Inicialização do PE16 | • 1320s - Alimentação da carga 5 |
| • 200s – Aumento de potência no PE16 | • 1360s - Fecho da linha de transmissão 17-19 |
| • 200s - Alimentação da carga 11 | • 1360s – Alimentação da carga 23 |
| • 200s - Alimentação da carga 16 | • 1360s – Alimentação da carga 26 |
| • 240s – Inicialização do PE18 | • 1360s – Alimentação da carga 7 |
| • 240s – Aumento de potência no PE18 | • 1400s – Fecho da linha de transmissão 25-27 |
| • 240s - Aumento de potência no PE16 | • 1400s – Fecho da linha de transmissão 6-8 |
| • 240s – Alimentação da carga 18 | • 1400s – Alimentação da carga 20 |
| • 280s – Alimentação da carga 16 | • 1440s - Alimentação da carga 28 |
| • 280s - Aumento de potência no PE18 | • 1440s - Alimentação da carga 9 |
| • 320s - Fecho da linha de transmissão 15-29 | • 1520s – Inicialização do GEN6 |
| • 360s - Alimentação da carga 30 | • 1560s – Fecho da linha de transmissão 29-31 |
| • 1240s – Inicialização do GEN1 | • 1400s - Alimentação da carga 32 |

Figura 4.16: Sequência de ações de Reposição de Serviço do Caso de Estudo 3

Tal como no caso anterior, parte-se de uma situação em que as máquinas GEN2 e GEN4 já se encontram em funcionamento, devido à sua capacidade de auto arranque (*blackstart*). A sequência de ações é igual até ao instante 200s, em que ambas as sequências diferem. Tal como foi analisado, no caso anterior optou-se por ligar a linha de transmissão 14-10, tendo depois como objetivo a energização da linha 10-12 e consequente alimentação da carga 13. Esta, para além de ser alimentada, serviria como auxílio à absorção de energia reativa proveniente das linhas e que demonstrou como uma das principais dificuldades do processo de reposição. Contudo, neste novo caso, é ligada a linha de transmissão 14-17, por forma a alimentar o PE presente no barramento 18 e assim proporcionar uma melhor ajuda na absorção/injeção de reativa. De salientar que a energização da linha 14-15 é na mesma efetuada, sendo contudo agora um dos objetivos a alimentação do PE16 para além da carga 16. É seguidamente apresentado um gráfico representativo da influência que o sistema de geração eólica tem na rede, nomeadamente no barramento 16.

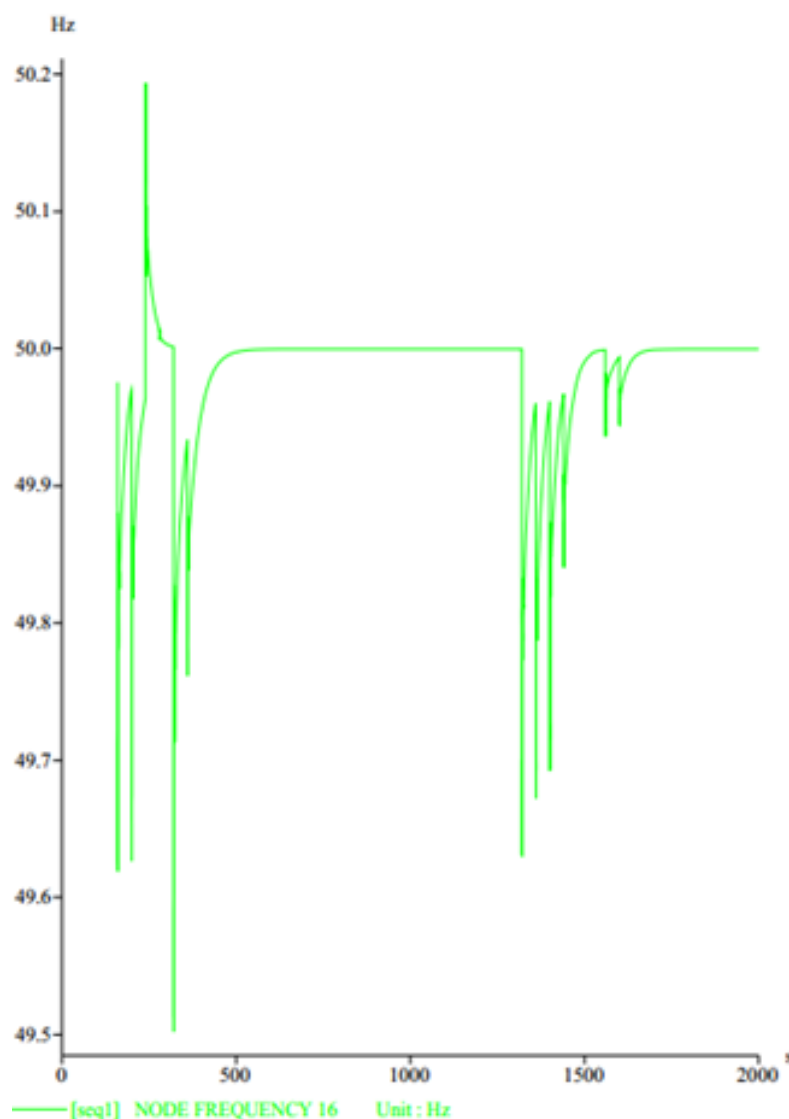


Figura 4.17: Evolução da frequência no barramento 16 do Caso de Estudo 3

Tal como se pode observar, no instante 200s ocorre uma variação na frequência derivada da entrada do sistema eólico. O limite máximo imposto é respeitado, atingindo a frequência um valor máximo de 50,194Hz e um mínimo de 49,502Hz derivado do fecho da linha de transmissão 15-29, que será abordado posteriormente.

Neste momento, introduziram-se no sistema 28 aerogeradores. Tal número advém do cálculo da primeira expressão anteriormente apresentada para a determinação do valor de potência ativa a injetar.

Em que valor(MW) será 33MW. Este foi o valor de potência máxima ativa injetada no sistema sem que ocorresse violação dos limites de frequência referidos. O aumento de potência do Parque Eólico é feito em por degraus, medindo a quantidade de potência ativa injetada no sistema e as suas consequências neste.

Observa-se agora que aos 240s se inicializou o PE18, sendo esta ação seguida de outras de aumento de potência no mesmo e no PE16, juntamente com as cargas 18 e 16. Tais ações revelaram-se necessárias para o sistema conseguir manter o equilíbrio após o fecho da linha 15-29. De facto, tal como se observou na Figura 4.17, a frequência desce para um valor mínimo conseguindo contudo recuperar e não violar o limite.

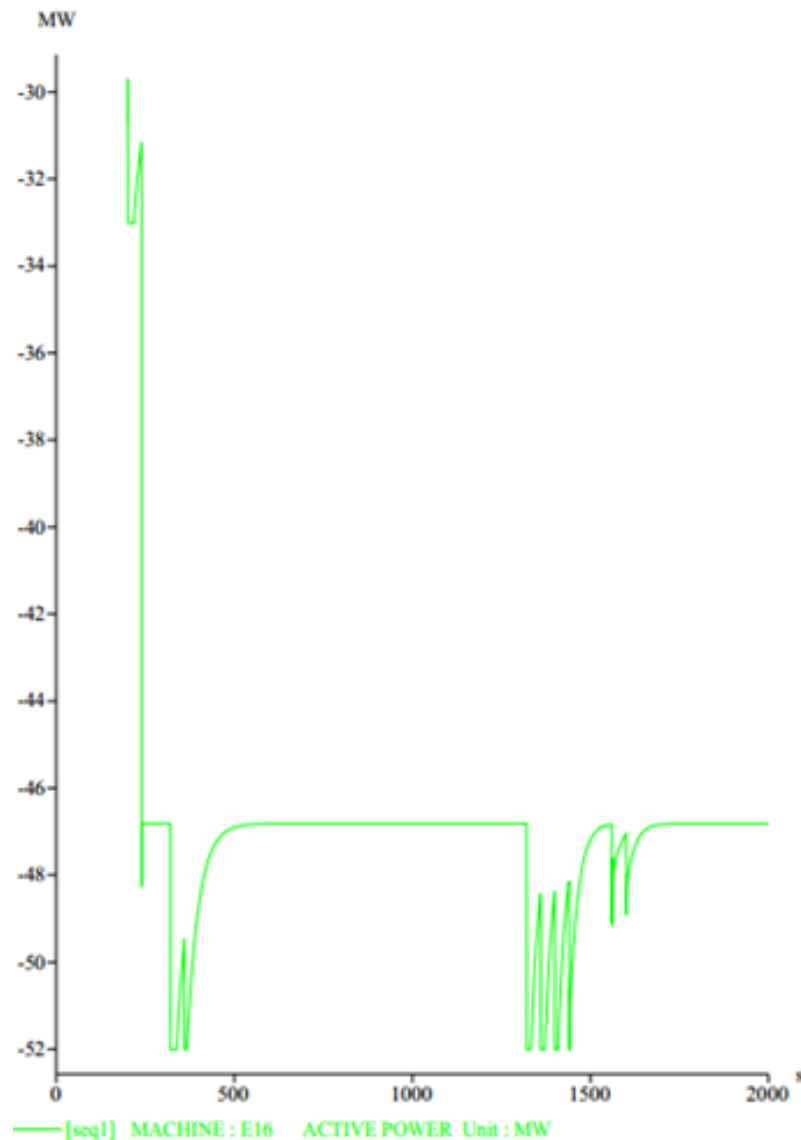


Figura 4.18: Evolução da potência ativa injetada no barramento 16 do Caso de Estudo 3

Na Figura anterior pode-se agora observar a injeção de potência ativa por parte do sistema produtor eólico PE16. Os valores negativos devem-se à modelização do macrobloco necessária no EUROSTAG dada a modelização dos injetores como cargas negativas. Assim, apesar de negativos, representam potência injetada, correspondendo estas variações de produção a respostas dos aerogeradores ao participar no controlo de frequência da rede. O mesmo se sucede caso fossem positivos, situação em que absorveriam energia.

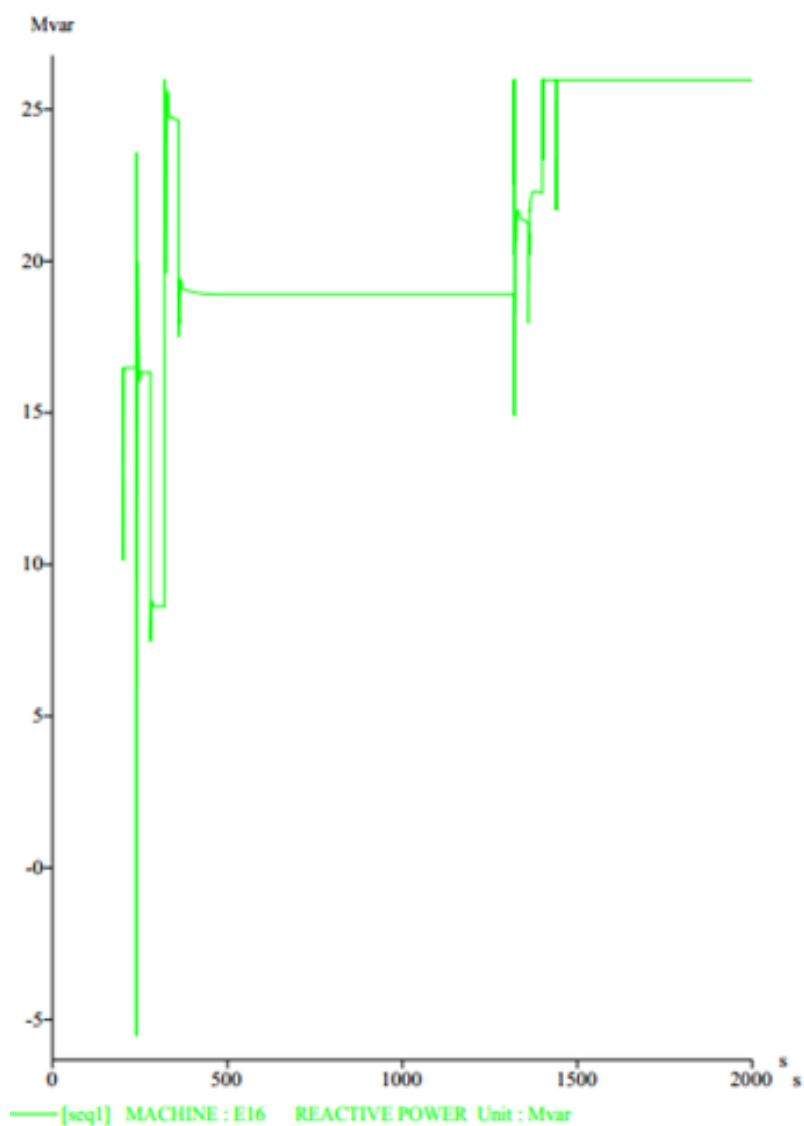


Figura 4.19: Evolução da potência reativa injetada no barramento 16 do Caso de Estudo 3

Já na questão da potência reativa, observa-se o quanto o sistema eólico contribui para a sua absorção, auxiliando assim o sistema nas várias operações. É dado especial destaque para o momento 1320s, altura em que ocorre o fecho de várias linhas e que o parque eólico absorve grandes quantidades de potência reativa proveniente das referidas linhas.

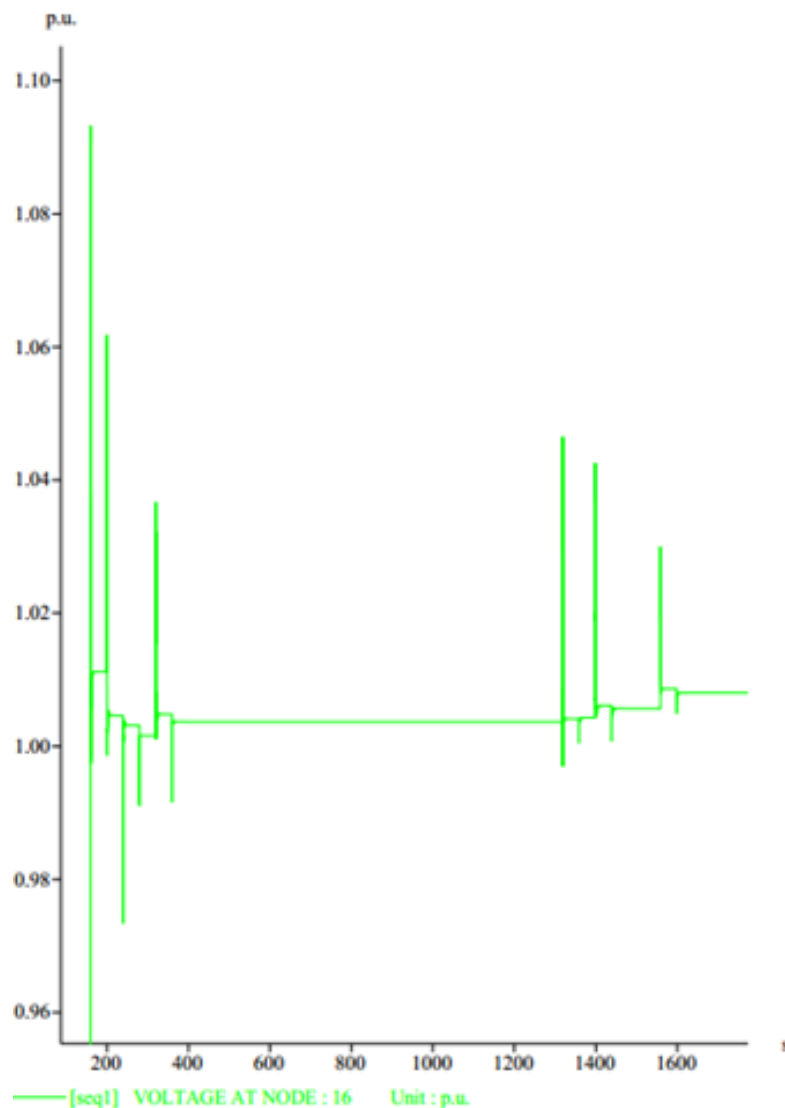


Figura 4.20: Evolução da tensão no barramento 16 do Caso de Estudo 3

Comparando os gráficos 4.20 e 4.21, pode-se observar que a potência reativa varia de acordo com a tensão no barramento 16. Há então um controlo de frequência em tensão proporcional por parte do sistema eólico. Noutros momentos, em que a tensão baixa, o sistema injeta potência reativa por forma a aumentar esse valor. É aqui que mais uma vez se comprova a utilidade deste tipo de geração no auxílio ao processo de Reposição de Serviço.

Neste momento de reposição teve de se aguardar pela inicialização do gerador GEN1 por forma a poder continuar com o processo. Assim vem aos 1240s a sua introdução no sistema. Tal permite o fecho das linhas 10-2 e 3-4, posteriormente. Dado que receberam a energia necessária para o seu arranque aos 80s, também agora aos 1280s estão as máquinas GEN3 e GEN5 disponíveis para entrar em funcionamento. Tendo então 3 novas máquinas disponíveis, o processo de Reposição de Serviço pode continuar e mais ações podem ser tomadas. Aos 1320s é então efetuada

a energização de várias linhas de transmissão, simultaneamente. Este pode assim ser considerado um ponto importante na Reposição pois implica a atuação de todas as máquinas presentes e em funcionamento. Entenda-se esta atuação pela absorção de toda a potência reativa que será gerada neste momento. Também aqui o auxílio da produção eólica é sentido, tal como será analisado posteriormente.

A redução do tempo de espera para que o GEN6 ficasse operacional é mais uma grande vantagem da introdução da produção eólica no auxílio à reposição. Tal acontece aos 1520s sendo que, contudo, houve ainda um período de tempo de cerca de 80s sem que qualquer ação ocorresse no sistema.

São seguidamente apresentadas as variações de potência ativa das 6 máquinas presentes no sistema.

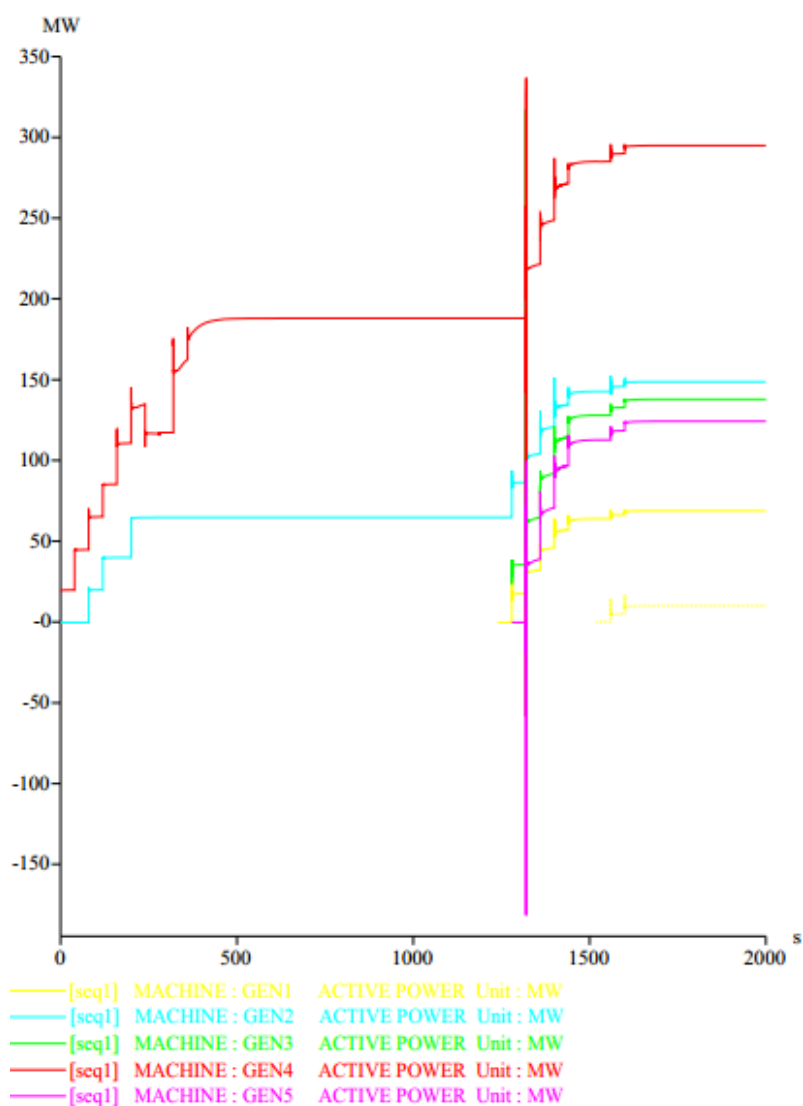


Figura 4.21: Evolução da potência ativa das máquinas do Caso de Estudo 3

Nota-se que há uma crescente participação de todas as unidades, sendo que as GEN2 e GEN4 começam aos 0s dado a sua capacidade de auto arranque (*blackstart*). Observa-se ainda que no início da reposição, antes da GEN1 iniciar, que os sistemas eólicos também contribuíram para uma diminuição do valor de energia gerada por parte das GEN2 e GEN4.

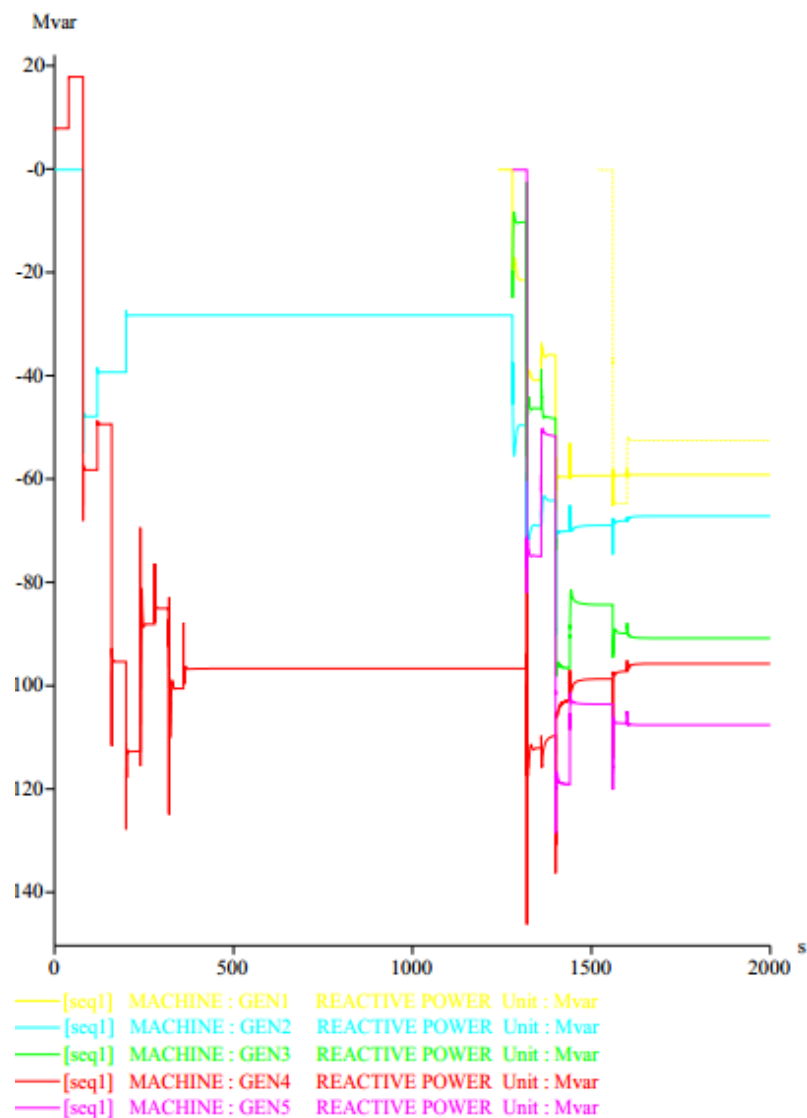


Figura 4.22: Evolução da potência reativa das máquinas do Caso de Estudo 3

Mais uma vez, e no mesmo período de tempo referido anteriormente, é visível o auxílio na absorção de reativa por parte dos parques eólicos, resultando na imagem de uma diminuição da geração da potência reativa. A GEN2 chega a uma produção de aproximadamente apenas 30MW. Tal deve-se mais uma vez ao facto de GEN4 ter uma maior capacidade de potência, sendo então a unidade principal aquando da existência em funcionamento de apenas estas duas máquinas.

4.5 Conclusões

Apresentadas as sequências encontradas para a Reposição de Serviço em cada um dos Casos de Estudo, é agora importante comparar resultados e ações tomadas. Tendo todos eles como principal objetivo a minimização do tempo de reposição e a maximização das cargas alimentadas durante o processo, as estratégias escolhidas para o seu cumprimento foram diferentes, provocando impactos distintos no S.E.E.. Procede-se então neste ponto da dissertação à análise de resultados segundo os parâmetros mais relevantes no estudo do impacto que estratégias deste tipo têm nas redes:

Estratégias de Reposição

Começa-se por um dos principais objetivos de todas as estratégias de Reposição aplicadas, não só nos Casos de Estudo analisados mas também em qualquer S.E.E. que necessite de tais ações. Os tempos de reposição encontrados correspondem ao tempo da última ação tomada em cada Caso de Estudo. Assim, vem:

- Caso de Estudo 1 – 1560 segundos que correspondem a 26 minutos.
- Caso de Estudo 2 – 2660 segundos que correspondem a 44 minutos e 20 segundos.
- Caso de Estudo 3 – 1600s que correspondem a 26 minutos e 40 segundos.

Estes valores permitem concluir o grande objetivo que esta dissertação pretendia provar. Reconhecendo que as unidades de geração renovável são uma parte integrante, crescente e cada vez mais fiável dos S.E.Es. torna-se então importante encontrar estratégias que incluam estas tecnologias nos variados Estados do Sistema, desde o Normal, passando pelo de Colapso e o de Reposição. A prova de que estes serviços podem ser conseguidos ad-vém, nesta primeira análise, da comparação dos tempos totais de Reposição de Serviço dos Casos de Estudo.

Recorrendo a uma estratégia de ações *Bottom-Up*, o S.E.E. no Caso de Estudo 1 foi dividido em ilhas elétricas. Criado como sendo idealmente constituído unicamente por máquinas síncronas térmicas com capacidade de auto arranque (*blackstart*), apresenta um tempo de Reposição que se pode considerar o mais baixo possível para a rede criada. Tal advém do facto de ser um Caso de Estudo tipicamente académico, dado que seria economicamente inviável possuir um S.E.E. com todas as unidades de geração com a característica referida. Serve então de base de comparação ao Caso de Estudo 2, mais próximo da realidade. Observa-se que, naturalmente, os tempos de Reposição de Serviço são diferentes, sendo o do último aproximadamente 18 minutos mais longo. Tempos de espera associados a processos de arranque de máquinas e impossibilidade de efetuar mais ações dadas as restrições de frequência/tensão do sistema, associadas por sua vez às próprias das unidades de geração (capacidade máxima de produção de potência ativa e consequente absorção de potência reativa) são os grandes causadores de tal morosidade. Tal como foi analisado e descrito no

Capítulo 4, a estratégia de Reposição do Caso de Estudo 1 para o 2 teve de ser alterada para que a energização das linhas de transmissão associadas às máquinas que não possuísem (*blackstart*) ocorresse primeiro que os ramos aos quais estão ligadas as cargas que precisam de ser alimentadas. Assim, apesar do objetivo principal se manter inalterado, são necessárias ações prévias que assegurem a segurança do S.E.E antes da alimentação das cargas. Devido a estas razões, o processo é então mais longo.

Já no Caso de Estudo 3, esse tempo volta a ser reduzido, provando a utilidade dos sistemas de geração eólicos no auxílio ao processo de Reposição de Serviço. A introdução dos Parques Eólicos, estrategicamente colocados para minimizar o tempo total de Reposição, revelou-se frutuosa. Tendo também de ser alterada a estratégia relativamente aos outros dois Casos de Estudo, a energização das linhas de transmissão de alta tensão em corrente alternada que alimentavam o sistema de geração eólico para o seu arranque tornou-se assim uma prioridade. Após o seu arranque, permitiu diminuir o tempo de arranque no processo total da Reposição da máquina GEN6, contribuindo assim em duas frentes:

- Auxílio na alimentação da energia necessária ao arranque das máquinas síncronas térmicas presentes no S.E.E.
- Maior leque de ações possível nos momentos em que no Caso de Estudo 2 o sistema se encontrava num estado de espera. Tal contribuição advém da injeção de potência ativa para a alimentação das cargas e absorção de potência reativa aquando do fecho de linhas de transmissão.

Trânsito de Potência nas Linhas

Naturalmente diferente, avaliou-se que estas estão sofrer um maior esforço (aumento da quantidade de potência presente) quando o sistema se encontra com várias unidades de geração em funcionamento.

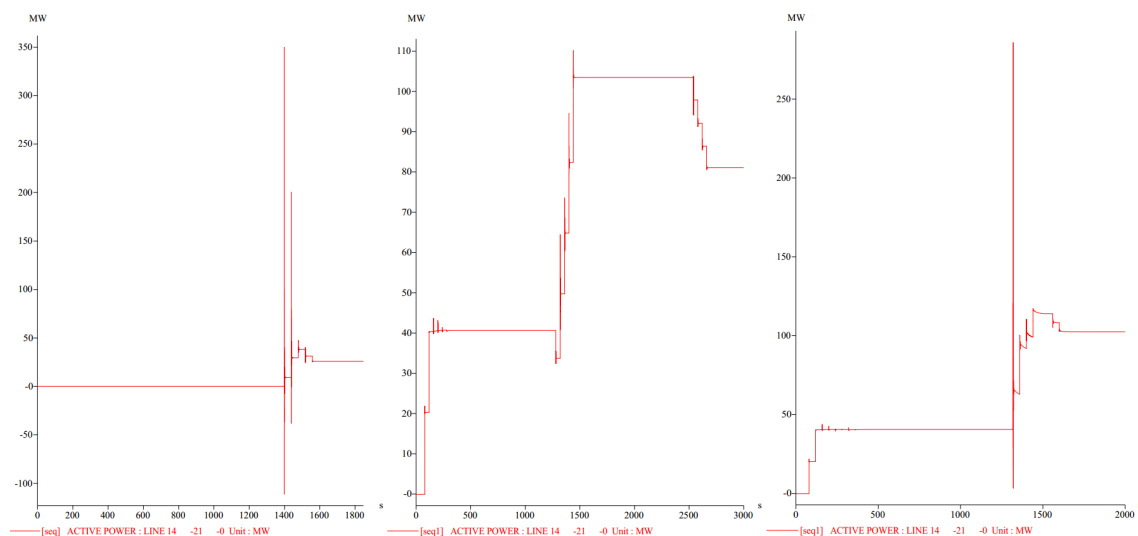


Figura 4.23: Potência Ativa na Linha de Transmissão 14-21 nos Casos de Estudo 1,2 e 3, respetivamente

Pela Figura 4.23 anterior, observa-se que a linha 14-21, aqui escolhida por ligar duas grandes áreas do S.E.E. em cada um dos Casos de Estudo analisados. Representando os Casos 1,2 e 3, respetivamente, é visível que a maior quantidade de potência ativa ocorre no primeiro Caso, aquando da ligação entre o S.E.E. e a ilha criada pelo GEN5. Tal como referido, existe já uma elevada quantidade de geração presente em ambos os pontos de ligação da linha de transmissão, provocando assim um esforço no transporte de tais quantidades.

Unidades de Geração

Tal como na análise anterior, também estas têm comportamentos diferentes e gerações distintas mediante as ações do Operador, o Estado do sistema e as prioridades da estratégia escolhida. A análise gráfica, efetuada nos vários Casos de Estudo analisados, permitiu concluir que quando a geração do sistema se encontra limitada, devido aos tempos de arranque de unidades de geração sem capacidade de *blackstart*, estas trabalham muito próximo do máximo das suas possibilidades de geração de potência ativa. É dado mais uma vez um especial destaque ao Caso de Estudo 3, que através dos Parque Eólicos, permitiu uma redução dos níveis de produção ativas das máquinas síncronas térmicas, apresentando-se assim como uma grande valia também no Estado de Reposição do S.E.E..

Capítulo 5

Conclusões e Perspetivas Futuras

A primeira abordagem a esta dissertação recaiu, naturalmente, na investigação de artigos e casos reais publicados sobre a Reposição de Serviço. Com esta análise, foi possível observar que existem dois claros momentos em que este assunto atingiu um grau de interesse elevado. O primeiro aconteceu no início dos 80 (final dos anos 70), quando se tornou necessário um maior conhecimento sobre a origem dos *blackouts* e a forma desastrosa em que deixavam os S.E.Es. Foram então criados grupos de trabalho e publicados inúmeros artigos sobre medidas gerais a tomar numa situação pós-perturbação parcial ou mesmo total. Sendo raras as perturbações parciais devido ao efeito em “cascata” destes distúrbios, quando ocorriam, deixam todo o S.E.E. em Estado de Colapso. O período entre o primeiro e o segundo momento, fica pautado pela publicação de artigos promovendo a integração de sistemas computacionais como auxílio ao Operador [10] e por estudos de redes mais específicas com estratégias semelhantes. Por fim, o segundo e atual momento, ocorre numa altura em que a consciencialização do uso de combustíveis fósseis, associada a políticas socioeconómicas de minimização de custos e melhoramento de serviços, reside não só nas entidades responsáveis pelos S.E.Es. mas também no próprio consumidor. A evolução das tecnologias renováveis veio minorar essa dependência sendo que a sua introdução numa rede que idealizada como sendo centralizada veio criar sérias dificuldades. Os artigos então publicados focam que essa integração é benéfica pelas razões apresentadas mas que pode também servir para melhor o próprio S.E.E.

Esta dissertação propôs então a analisar o impacto que a PD, mais especificamente a geração eólica, teria no apoio ao processo de Reposição de Serviço numa situação de *blackout* total.

5.1 Reposição de Serviço e Ilhas Elétricas

Os três Casos de Estudo foram criados por forma a desenvolver uma base de comparação para posterior análise do principal objetivo desta dissertação: analisar o impacto que a PD, mais especificamente a geração eólica, teria no apoio ao processo de Reposição de Serviço

numa situação de *blackout* total. Relativamente ao Caso de Estudo 1, foi apresentada uma rede elétrica com longas linhas de transmissão de alta tensão em corrente alternada, com unidades de geração térmicas com capacidade de *blackstart*. Este primeiro caso permitiu um conjunto de conclusões:

- A criação de ilhas, proporcionando estratégias de Reposição de Serviço paralelas, reduz o tempo total do processo. Sendo esta minimização um dos objetivos principais, este tipo de estratégia deve então ser considerado.
- O facto de todas as máquinas estarem imediatamente operacionais permitiu que o processo não entrasse num estado de espera, sendo sempre possível efetuar as ações pretendidas. Estas estavam, contudo, sempre limitadas pelos limites previamente estabelecidos de tensão e frequência.
- A execução de múltiplas ações simultâneas (por exemplo, a energização de várias linhas a um certo momento) revelou um esforço adicional por parte das unidades de geração. Apesar de possível, é tecnicamente desaconselhado pois o sistema encontra-se num estado de pós-colapso, sendo a estabilidade um dos maiores requisitos. A manutenção no Estado de Reposição é em muitos casos tida em consideração antes de qualquer outra, pois a hipótese do S.E.E. regressar a uma situação de Colapso e de provocar eventos em “cascata” é considerada muito negativa.

Já no Caso de Estudo 2, observa-se mais uma área de foco da Reposição de Serviço. Tendo no Caso anterior sido aplicada uma estratégia de restauro do sistema através de ações paralelas devido à existência de ilhas elétricas, este debruça-se sobre as dificuldades encontradas num S.E.E. em que apenas algumas máquinas possuem capacidade de *blackstart*. É então evidente a mudança na estratégia de atuação à Reposição de Serviço, sendo agora uma das prioridades energizar as linhas que conectam as unidades de geração com e sem a capacidade referida. Encontra-se assim o problema temporal associado ao arranque das máquinas, colocando, por vezes, o sistema num Estado de Espera. Adicionalmente, a Reposição tem de ser otimizada para que se continue a cumprir a maximização da alimentação das cargas. Tal apresenta-se como mais um entrave à minimização do tempo total do processo. Esta alimentação só pode ser efetuada depois de energizadas as linhas de transmissão que estabelecem a ponte com o S.E.E. A quantidade de potência reativa gerada pelo fecho destas demonstrou ser uma das principais dificuldades neste Caso de Estudo.

Por fim, é elaborado o Caso de Estudo 3, cujas características e princípios de auto arranque das máquinas síncronas são em tudo análogos ao Caso de Estudo 2, com exceção da introdução de dois Sistemas de Produção Eólica. Estes, a par das máquinas térmicas sem capacidade de *blackstart*, também necessitam de energia para o seu arranque. A estratégia foi mais uma vez modificada para se admitir a presença deste tipo de unidades de geração. São então retiradas algumas conclusões:

- A presença de Sistemas de Produção Eólicos podem ser úteis no auxílio ao processo de Reposição de Serviço mediante a sua localização. Cabe ao Operador analisar quais unidades de geração devem receber a energia necessária para o seu arranque em primeiro lugar.
- Esta introdução provocou uma forte variação nos níveis de tensão e frequência do S.E.E., tendo sido cuidadosamente analisada a quantidade de potência ativa injetada para não provocar a violação dos limites definidos anteriormente.

5.2 Perspetivas Futuras

Tal como referido, o trabalho desenvolvido cobre apenas uma parte do vasto campo de estudo e investigação associado à Reposição de Serviço. Mas tendo em consideração que atualmente existe um renovado interesse nesta área devido à possibilidade de integração de Sistemas de Geração Renovável contribuírem para o auxílio do Operador num processo de Reposição de Serviço, são inúmeras as possibilidades de investigação. Uma maior integração de sistemas computacionais, que identifiquem com maior precisão o local da perturbação e os componentes da rede afetados, seria uma mais-valia para o Operador de Sistema. Se a tal introdução forem melhoradas as características da rede, existirá uma maior preparação para a ocorrência destes eventos. Esta especificação de características da rede passa por:

- Modelização real do comportamento das cargas do sistema. Como é sabido, as cargas não são fixas e os casos aqui analisados não tiveram tal cenário em consideração. Esta simulação torna-se muito difícil dada a imprevisibilidade inerente associada aos perfis de consumo mas quanto mais aproximada for, mais reais e fiáveis serão os resultados obtidos.
- Introdução de um maior número de Parques Eólicos de menor potência, tendo assim como objetivo o estudo do impacto entre possuir uma quantidade menor mas com mais potência de geração ou um maior número, estrategicamente colocados pelo S.E.E..
- Modelização de outras tecnologias de geração renovável, estudando um sistema apenas constituído por uma máquina síncrona térmica.

A grande dificuldade dos artigos e estudos publicados sobre esta temática é a generalização de estratégias. Também aqui se tentou criar Casos que pudessem ser extrapolados para outras situações mas restrições de tensão, frequência, de integração de energia renovável afetam sempre todo o S.E.E. e qualquer estratégia de Reposição de Serviço. Assim, um objetivo de trabalho futuro consiste na exploração de processos de otimização com apoio de tecnologias computacionais para uma deteção de perturbações no mínimo tempo possível ou auxílio ao Operador prestando toda a informação disponível do estado da rede. Como se

analisou nesta dissertação, nos campos em que existiam comportamentos não modelizáveis, optou-se por atribuir valores fixos. Se estas ferramentas digitais proporcionarem um conhecimento total do Estado e componentes do S.E.E., o trabalho do Operador será largamente facilitado.

Anexo A

Loren Ipsum

Depois das conclusões e antes das referências bibliográficas, apresenta-se neste anexo numerado o texto usado para preencher a dissertação.

A.1 O que é o *Loren Ipsum*?

Lorem Ipsum is simply dummy text of the printing and typesetting industry. Lorem Ipsum has been the industry's standard dummy text ever since the 1500s, when an unknown printer took a galley of type and scrambled it to make a type specimen book. It has survived not only five centuries, but also the leap into electronic typesetting, remaining essentially unchanged. It was popularised in the 1960s with the release of Letraset sheets containing Lorem Ipsum passages, and more recently with desktop publishing software like Aldus PageMaker including versions of Lorem Ipsum [?].

A.2 De onde Vem o Loren?

Contrary to popular belief, Lorem Ipsum is not simply random text. It has roots in a piece of classical Latin literature from 45 BC, making it over 2000 years old. Richard McClintock, a Latin professor at Hampden-Sydney College in Virginia, looked up one of the more obscure Latin words, *consectetur*, from a Lorem Ipsum passage, and going through the cites of the word in classical literature, discovered the undoubtable source. Lorem Ipsum comes from sections 1.10.32 and 1.10.33 of “*de Finibus Bonorum et Malorum*” (The Extremes of Good and Evil) by Cicero, written in 45 BC. This book is a treatise on the theory of ethics, very popular during the Renaissance. The first line of Lorem Ipsum, “*Lorem ipsum dolor sit amet...*”, comes from a line in section 1.10.32.

The standard chunk of Lorem Ipsum used since the 1500s is reproduced below for those interested. Sections 1.10.32 and 1.10.33 from “*de Finibus Bonorum et Malorum*” by Cicero

are also reproduced in their exact original form, accompanied by English versions from the 1914 translation by H. Rackham.

A.3 Porque se usa o Loren?

It is a long established fact that a reader will be distracted by the readable content of a page when looking at its layout. The point of using Lorem Ipsum is that it has a more-or-less normal distribution of letters, as opposed to using “Content here, content here”, making it look like readable English. Many desktop publishing packages and web page editors now use Lorem Ipsum as their default model text, and a search for “lorem ipsum” will uncover many web sites still in their infancy. Various versions have evolved over the years, sometimes by accident, sometimes on purpose (injected humour and the like).

A.4 Onde se Podem Encontrar Exemplos?

There are many variations of passages of Lorem Ipsum available, but the majority have suffered alteration in some form, by injected humour, or randomised words which don’t look even slightly believable. If you are going to use a passage of Lorem Ipsum, you need to be sure there isn’t anything embarrassing hidden in the middle of text. All the Lorem Ipsum generators on the Internet tend to repeat predefined chunks as necessary, making this the first true generator on the Internet. It uses a dictionary of over 200 Latin words, combined with a handful of model sentence structures, to generate Lorem Ipsum which looks reasonable. The generated Lorem Ipsum is therefore always free from repetition, injected humour, or non-characteristic words etc.

Referências

- [1] T. E. Dy Liacco et al. The adaptive reliability control system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Maio 1967.
- [2] K. Carlsen L. Fink. Operating under stress and strain. *IEEE Spectrum*, Março 1978.
- [3] C.-C. Liu et al. Generation capability dispatch for bulk power system restoration: A knowledge-based approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, Fevereiro 1993.
- [4] W. Sun et al. Black start capability assessment in power system restoration. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Julho 2011.
- [5] J. N. Jiang et al. Power system restoration planning and some key issues. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Julho 2012.
- [6] M. M. Adibi. *Power System Restoration: Methodologies Implementation Strategies*. IEEE Press, 2000.
- [7] W. A. Johnson et al. System restoration - deploying the plan. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Janeiro 1982.
- [8] M. M. Adibi et al. Power system restoration planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Fevereiro 1994.
- [9] F. J. Hubert E. J. Simburger. Low voltage bulk power system restoration simulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Novembro 1981.
- [10] T. Kostic et al. Decision aid function for restoration of transmission power systems: Conceptual design and real time considerations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Agosto 1998.
- [11] M. M. Adibi et al. Power systems restoration issues. *IEEE Computer Applications in Power*, Abril 1991.
- [12] J. Morren et al. Contribution of dg units to primary frequency control. *2005 International Conference on Future Power Systems*, Novembro 2005.
- [13] J. Morren et al. Contribution of dg units to voltage control: Active and reactive power limitations. *2005 IEEE Russia Power Tech*, Junho 2005.
- [14] M. Hlatshwayo et al. Impacts of dg penetration in the reliability of distribution systems. *2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Outubro 2010.
- [15] P. Fuangfoo et al. Pea guidelines for impact study and operation of dg for islanding operation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Outubro 2008.
- [16] H. Zeineldin et al. Impact of dg interface control on islanding detection. *2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Junho 2005.

- [17] D. M. Falcão C. L. T. Borges. Impact of distributed generation allocation and sizing on reliability, losses and voltage profile. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, Junho 2003.
- [18] L. M. L. S. Seca. Estudo de estratégias de funcionamento em rede isolada e reposição de serviço em redes de distribuição com elevada componente de produção distribuída. Tese de mestrado, FEUP.
- [19] R. Doherty et al. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, Outubro 2009.
- [20] T.C. Mollo et al. Power system restoration with distributed generation in a south african network. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Julho 2012.
- [21] M. M. Adibi et al. Estimating restoration duration. *IEEE Transactions on Power Systems*, Novembro 1999.
- [22] W. Sun et al. Optimal generator start-up strategy for power system restoration. *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2009.
- [23] R. E. Perez-Guerrero et al. Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, Julho 2008.
- [24] C.-C. Liu et al. Development and evaluation of system restoration strategies from a blackout. *Power Systems Engineering Research Center (PSERC) 09-08*, Setembro 2009.
- [25] J. W. Feltes et al. Some considerations in the development of restoration plans for electric utilities serving large metropolitan áreas. *IEEE Transactions on Power Systems*, Maio 2006.
- [26] W. Sun et al. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, Agosto 2011.
- [27] Tractabel. Eurostag and associated products, Abril 2014. URL: <http://www.eurostag.be/en/products/eurostag/the-reference-power-system-dynamic-simulation/>.
- [28] RTE Tractebel. Eurostag 4.5 theory manual. Junho 2010.
- [29] RTE Tractebel. Eurostag tutorial – example 1. Junho 2010.
- [30] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- [31] IEEE Power Engineering Society. Ieee recommended practice for excitation system models for power system stability studies. Abril 2006.
- [32] H. M. da Costa. Reposição de serviço em sistemas com produção eólica onshore e offshore com ligação dc. Tese de mestrado, FEUP.
- [33] ENTSO-E. P1 – policy 1: Load-frequency control and performance. Março 2009.